

## *Les technologies clés : une prospective et un éclairage pour des décisions*

**D**ans un monde où les technologies évoluent de plus en plus vite, et où le choix parmi des alternatives technologiques peut s'avérer décisif, il est important de nourrir et structurer une réflexion nationale sur les orientations les plus prometteuses et créatrices de valeur et d'emplois. C'est ainsi que depuis 1995, le ministère chargé de l'Industrie réalise tous les cinq ans une étude destinée à identifier et caractériser les technologies « clés » qui contribuent au développement économique de la France sur un horizon à moyen terme de cinq à dix ans.

L'étude *Technologies clés 2015* que nous publions aujourd'hui en constitue la quatrième édition. Elle a mobilisé, sous la supervision d'un comité stratégique présidé par Denis RANQUE, président du Cercle de l'industrie, plus de 250 experts que je tiens à remercier pour leur contribution, et a pris en compte les résultats de plusieurs travaux, comme notamment l'exercice de prospective « France 2025 » conduit sous l'égide du Centre d'analyse stratégique, ou encore la stratégie nationale de recherche et d'innovation.

Cette étude, menée à intervalles réguliers, est ainsi devenue une référence dans la « boîte à outils » des politiques publiques nationales en faveur de l'innovation et de la compétitivité des entreprises. Elle remplit plusieurs missions :

- en premier, elle constitue un **formidable instrument de sensibilisation au développement technologique**, et de valorisation des filières scientifiques et techniques. En mettant à l'honneur l'innovation technologique, elle souligne le rôle essentiel de l'industrie dans la construction de notre avenir ;
- ensuite, elle permet d'**évaluer la capacité de notre tissu industriel à investir le champ des opportunités** générées par les 85 technologies clés en 2015, qu'il s'agisse des technologies diffusantes susceptibles de générer des gains de productivité, ou des technologies d'avenir, ouvrant la voie au développement de nouveaux marchés. Cette analyse stratégique des forces et des faiblesses de la France dans plusieurs domaines technologiques a été complétée cette année par la formulation de recommandations susceptibles de favoriser leur déploiement. Une attention particulière a aussi été portée à la dimension sociale des différentes technologies ainsi qu'aux services qui leur sont associés ;

• enfin, elle constitue **un outil structurant d'aide à la décision pour les entreprises comme pour les pouvoirs publics**. Les entreprises souhaitant élaborer leur stratégie de R&D ou engager une démarche d'innovation pourront trouver dans cet ouvrage des éclairages utiles sur les applications et les enjeux technologiques, ainsi que sur les principaux acteurs et centres de compétences vers lesquels se tourner. Il en va de même pour l'État, les collectivités territoriales et les principales structures au service de l'innovation et de la compétitivité, comme par exemple Oséo ou l'Agence nationale de la recherche, qui pourront s'appuyer sur cette étude pour définir l'orientation de leur politique de soutien aux projets d'entreprise ou l'organisation d'actions collectives en direction des acteurs économiques.

La diffusion en matière d'innovation et de technologie étant tout aussi importante que les progrès technologiques eux-mêmes, les résultats de l'étude *Technologies clés 2015* seront diffusés le plus largement possible auprès des chefs d'entreprise et des décideurs en région, à travers le réseau territorial des Direccte ou par le biais d'Internet.

Je souhaite que le lecteur de l'étude, chef d'entreprise, ingénieur, chercheur, membre d'un pôle de compétitivité ou d'une grande filière industrielle, puisse y trouver les informations qui contribueront à éclairer sa compréhension des enjeux ou ses choix, à mieux orienter son action et à identifier ses partenaires. Et que ce travail contribuera ainsi à la nécessaire amélioration du potentiel industriel de notre pays, et par là, à sa prospérité et à ses emplois.

## **Éric BESSON**

Ministre de l'Industrie, de l'Énergie  
et de l'Économie numérique

**D**es technologies clés, pour quoi faire ? L'objectif fondamental de ce travail de prospective technologique consiste, après avoir positionné la France dans son environnement international, à procurer des gains d'efficacité dans le monde de l'entreprise comme dans la gestion publique. Il est voisin dans son esprit d'autres exercices menés concurremment par de grands pays industrialisés.

L'étude sur les technologies clés à horizon 2015 est un document attendu : pour mémoire, l'étude précédente, qui visait l'horizon 2010, a donné lieu à environ un million de pages lues sur Internet.

Luc ROUSSEAU, directeur général de la Compétitivité, de l'industrie et des services m'a proposé de prendre la présidence du comité stratégique de l'étude en me demandant de veiller à la bonne orientation des dimensions scientifique, technique et industrielle de l'exercice, et de m'assurer de la collégialité du travail à accomplir.

Pour cela j'ai réuni, dans ce comité, un certain nombre de personnalités qui toutes ensemble permettaient de dégager une vision partagée des enjeux pour notre pays.

Les échanges réguliers avec les acteurs opérationnels de l'étude ont permis de définir parmi sept secteurs les 85 technologies clés qui devront faire l'objet d'une attention soutenue de la part des chefs d'entreprises, des cadres, des décideurs publics, car leur maîtrise permettra de mieux relever les défis qui se posent à notre société et de donner à nos entreprises de meilleurs avantages compétitifs.

Que dit-elle de neuf par rapport aux exercices précédents ? Si les trois quarts environ des technologies déjà repérées en 2005 comme cruciales restent présentes, leurs contenus détaillés, leurs marchés de débouchés, leur champ concurrentiel, la quantification de leurs importances relatives, ont évolué. D'autre part, la présente étude s'est attachée à fournir des clés aux chefs d'entreprises à la recherche de nouveaux vecteurs pour innover comme aux décideurs publics qui vont devoir arbitrer avec des budgets contraints. Enfin, une analyse sur les technologies diffusantes, importantes pour l'économie, a été conduite.

Ce sont environ 250 experts qui ont été consultés pour collecter les informations permettant un diagnostic sur le contexte et les enjeux des différents secteurs, relever les grandes tendances d'évolution qui leurs sont associées, identifier les évolutions technologiques majeures et les acteurs de la R&D qui les conduisent. De plus les feuilles de route stratégiques des pôles de compétitivité à vocation mondiale ont été intégrées dans les analyses.

Je tiens à les remercier tous pour leur précieuse contribution,

Cet exercice a été conduit pour déterminer sur chacune des technologies les principales forces et faiblesses, atouts et menaces des compétences françaises.

Les développements d'innovations technologiques doivent répondre simultanément à deux types d'attentes sociétales ; d'une part, le besoin de progrès, de création de valeur, d'emplois, de bien-être, de sécurité ; d'autre part, la prise en compte des risques, réels ou perçus, inhérents à toute innovation. L'étude a donc aussi mentionné, pour chacune des technologies, les facteurs qui pouvaient en freiner le déploiement.

Enfin, en vue d'augmenter la création de valeur sur le territoire national, les différents aspects liés à l'identification et au développement de nouveaux types de services concourant à la compétitivité et à l'amélioration de notre balance commerciale ont été examinés sous l'angle des opportunités offertes par les différentes technologies et marchés.

Les différentes monographies et fiches technologies clés constituant le document final s'accompagnent de propositions de recommandations formulées par les différents groupes de travail et validées par le comité stratégique. Ces recommandations proposent aux lecteurs, à différents niveaux de mise en œuvre (investissements, partenariats, formation, réglementation, normalisation...), des pistes pour créer un environnement favorable au déploiement de ces technologies.

L'étude *Technologies clés 2015* sera rapidement utilisée puisqu'elle fait partie, au même titre que la stratégie nationale de recherche et d'innovation et la stratégie nationale sur l'énergie, et en cohérence avec ces dernières, des documents de référence qui vont permettre de guider les choix à retenir dans le cadre des investissements d'avenir notamment en ce qui concerne les instituts de recherche technologique et les instituts thématiques d'excellence en matière d'énergie décarbonée.

Je forme le vœu que les résultats de *Technologies clés 2015* se déclinent en de multiples actions en faveur du développement de nos industries, et du succès de nos chercheurs, ingénieurs et techniciens, et qu'ainsi ils contribuent à offrir à notre pays les meilleures conditions de son développement dans la compétition mondiale.

**Denis RANQUE**

Président du comité stratégique

## *L'exercice technologies clés : une réflexion prospective à court-moyen terme*

**S**ortir de la crise par le haut : telle est la volonté qui anime l'industrie et les services exposés à la concurrence extérieure en France. Ce défi de la compétitivité, ardente obligation pour les entreprises comme pour les acteurs publics, s'appuie aujourd'hui sur plusieurs outils : la politique des pôles de compétitivité, pour renforcer sur les territoires l'émergence de projets collaboratifs à fortes retombées, qu'il s'agisse de projets de R&D ou de projets d'équipements structurants ; des politiques de filières et de métiers, pour redensifier le tissu industriel, ainsi que les États généraux de l'industrie en ont montré le besoin ; et des stratégies d'innovation pour les investissements d'avenir, financés par l'emprunt national, qui supposent connues les technologies les plus porteuses qui ont des chances de prospérer sur le territoire. Des analyses stratégiques et prospectives qui anticipent les tendances, décrivent les opportunités et les menaces, analysent les forces et faiblesses du tissu industriel et des services liés, permettent de repérer à grands traits ces technologies. Grâce à ces réflexions, les forces vives de l'économie et de la recherche disposent d'éclairages et d'outils d'aide à la décision pour focaliser leurs efforts sur les innovations qui feront la richesse de demain, et qui permettront à l'économie nationale de valoriser pleinement ses atouts, en Europe et dans le monde.

L'innovation, facteur clé de développement économique, repose sur un ensemble de démarches scientifiques, technologiques, organisationnelles, financières et commerciales qui aboutissent à la réalisation et à la vente de services, produits ou procédés nouveaux ou améliorés. Concernant le volet technologique, la France, à l'instar de plusieurs pays développés ou émergents, réalise périodiquement une étude visant à identifier et caractériser les technologies « clés » pour son développement économique. Cette étude est conduite sous l'égide du ministère de l'Industrie tous les cinq ans depuis 1995.

La présente étude, qui identifie les technologies clés à l'horizon 2015-2020, a été menée au cours de l'année 2010. Pour la première fois une distinction est opérée entre les **technologies diffusantes**, souvent existantes, dont la diffusion se révèle stratégique pour la compétitivité d'un secteur d'activité donné, et les **technologies d'avenir**, souvent émergentes, présentant un potentiel de développement en France et dans le monde. La cohérence avec les réflexions stratégiques menées au plan national a par ailleurs été un point d'attention du comité stratégique : ainsi l'étude a tenu compte de la stratégie nationale de recherche et d'innovation définie fin 2009 sous l'égide du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, des réflexions menées en 2009-2010 dans le cadre des États généraux de l'industrie, des travaux en cours sur la stratégie nationale de recherche sur l'énergie (SNRE), et de la prospective de défense pour ses impacts sur les activités civiles. De même les feuilles de route stratégiques des pôles de compétitivité ont été exploitées.

Sur la base d'une analyse de type atouts-attraits, l'étude a permis d'identifier 85 technologies : 23 sont des technologies diffusantes et 21 ont été caractérisées comme technologies d'avenir. Près de la moitié, 41, ont été considérées comme appartenant aux deux catégories. Cette particularité s'explique par deux raisons : d'une part, ces technologies sont très diffusantes car elles concernent un large panel de secteurs

ou d'applications potentiels ; d'autre part, pour ces technologies, des développements sont encore nécessaires pour aboutir à un niveau d'excellence mondial ou le conforter.

Le lecteur prendra connaissance des sept monographies\* et des fiches correspondantes en gardant trois points à l'esprit :

- un effort de synthèse a été nécessaire pour mettre en exergue les messages clés et ne pas noyer le lecteur sous un trop grand nombre de considérations. Nombre des 85 technologies clés sont en fait des familles de technologies qui permettent de répondre à un besoin, ou de réaliser une fonction. Le lecteur expert aura légitimement envie d'aller plus loin que la description, volontairement limitée à deux pages, de chaque technologie ; la consultation de la bibliographie figurant à la fin de chacune des sept parties thématiques de l'ouvrage peut contribuer à de tels approfondissements ;
- les considérations économiques liées à chaque technologie clé (enjeux, taille des marchés, état de la concurrence, stratégies d'autres pays, stratégies résultant d'orientations au sein de l'Union européenne...) ne doivent être considérées que comme des points de repère. Une entreprise qui souhaiterait saisir les opportunités décrites, et se positionner sur les marchés correspondants, devra naturellement approfondir l'analyse de ces marchés et bâtir une stratégie de conquête adaptée. En effet, les technologies comme la taille des marchés accessibles peuvent évoluer. De même, le caractère clé des technologies est lié au potentiel industriel et économique français, qui est lui-même évolutif : il s'agit donc d'une photographie au moment où l'étude est élaborée ;
- les horizons de temps donnés à l'étude sont relativement courts – cinq ans – tout en s'inscrivant, pour de nombreux métiers, dans des perspectives plus longues jusqu'à dix ans. Dans ce cas la prospective suppose des scénarios alternatifs : ce sont des scénarios médians, aussi cohérents que possible, qui ont été en général retenus.

(\*) Chimie-Matériaux-Procédés, TIC, Environnement, Énergie, Transports, Bâtiment, Santé, Agriculture et Agroalimentaire

Les principaux éléments de contexte socio-économique international, synthétisés ci-dessous, permettent de mettre en perspective les analyses sectorielles objets des monographies des chapitres suivants, et les choix des technologies clés des secteurs économiques correspondants. Ils représentent autant de facteurs externes, d'opportunités ou de menaces, qui influenceront l'économie française dans les prochaines années.

Les travaux « France 2025 » conduits par le Centre d'analyse stratégique [1], ainsi que les analyses menées à l'occasion de l'élaboration de la stratégie nationale de recherche et d'innovation [2] et des États généraux de l'industrie [3], fournissent des ressources documentaires de premier plan, dont les pages suivantes proposent une synthèse. Nous renvoyons le lecteur qui souhaite approfondir l'analyse aux rapports en références.

## Le contexte international

### Mondialisation et déplacement du centre de gravité économique du monde

Sur le plan géopolitique, on retiendra évidemment comme élément de contexte primordial la mondialisation. Selon l'OCDE, elle comporte trois dimensions :

- l'internationalisation, c'est-à-dire le développement des flux d'importation/exportation ;
- la trans-nationalisation, qui est l'essor des flux d'investissement et des implantations à l'étranger ;
- la globalisation, avec la mise en place de réseaux mondiaux de production et d'information.

Selon que l'on s'y prépare activement ou qu'on la subisse passivement, la mondialisation représente une formidable opportunité de développement économique, ou une menace pour notre prospérité.

Dans ce contexte, les quatre pays émergents rassemblés sous les initiales « BRIC » (Brésil, Russie, Inde, Chine) sont vus comme des géants à l'influence croissante sur plusieurs points :

- leur population, qui représente 40 % de la population mondiale ;
- leur croissance économique, qui compte pour 50 % de la croissance économique actuelle, leur PIB représentant 15 % du PIB mondial ;
- leur superficie (28 % des terres émergées hors Antarctique).

En particulier, la Chine, qui a été longtemps la première puissance économique mondiale, aspire à retrouver ce rang, et est en passe d'atteindre son objectif, tout au moins en termes de PIB.

En outre, l'Afrique a une population qui dépasse désormais en 2010 le milliard d'habitants (16 % de la population mondiale) et figure parmi celles qui croissent le plus rapidement sur la planète. Si son PIB n'atteignait encore que 2,6 % du PIB mondial en 2008, avec de fortes disparités entre les pays, ses taux de croissance ont été régulièrement au-dessus de 5 % depuis 2005. Elle présente, pour ces raisons et beaucoup d'autres, un intérêt majeur qu'il convient de prendre en compte dans les stratégies de développement des entreprises.

### Démographie

Dans une tendance globale de l'accroissement de la population mondiale jusqu'à 9 milliards d'individus à l'horizon 2050, l'âge moyen ou le pourcentage de personnes âgées dans la population augmente. Le phénomène du vieillissement ne touche pas seulement les pays développés mais, sous l'effet de l'allongement de l'espérance de vie et/ou d'une diminution de la fécondité, presque tous les pays sont concernés.

Le taux d'urbanisation au niveau mondial passera de 47 % en 2000 à 65 % en 2030 et 75 % en 2100. Les évolutions les plus importantes auront lieu en Asie et en Afrique. Même les zones déjà très urbanisées verront ce taux progresser (de 79 à 85 % d'ici à 2100 pour les pays Asie-Pacifique de l'OCDE). En outre, la

population mondiale devrait se concentrer sur le littoral, les experts estimant que 75 % de la population mondiale vivra à moins de 50 km d'une côte à l'horizon 2050.

### **Crises et instabilité financière et monétaire**

Du fait de la mondialisation, les conséquences des crises, quelles qu'elles soient (financières, militaires...), ne restent désormais plus cantonnées à une région, leurs effets se propagent désormais dans le monde à la vitesse des réseaux de communication. Leur fréquence d'occurrence augmente également, et elles sont de plus en plus souvent communes à plusieurs secteurs industriels. La crise que nous traversons depuis 2008 a pris naissance dans la sphère financière et s'est propagée à plusieurs secteurs. Les marchés de commodités comme l'automobile et le bâtiment ont été particulièrement touchés.

Les finances publiques des États sont notées par les agences de notation (Standard & Poors, Moody's, Fitch), ce qui, dans un contexte de libre circulation des capitaux, permet aux investisseurs une lecture du climat économique et du risque (et donc sa rémunération en termes de taux d'intérêt). Les crises de finances publiques des années quatre-vingt-dix et début 2000 étaient perçues comme lointaines par les Européens (Argentine, par exemple). La situation grecque au printemps 2010, irlandaise à l'automne de la même année, et la garantie apportée par ces États à des banques en situation critique, mais aussi la dégradation brutale des taux d'endettement des pays plus prospères sous l'effet de la crise sont venus rappeler qu'au-delà de certains taux d'endettement il n'est plus de croissance soutenable. Ces données impliquent des évolutions qui modifient sensiblement diverses perspectives de marchés et des priorités d'investissements.

La variabilité des taux de change affecte fortement les entreprises. La parité euro/dollar était de 1,17 dollar pour 1 euro lors de sa première cotation en 1999. Après un plus bas en 2000 (0,82 dollar), l'euro a atteint en 2008 un sommet proche de 1,60 dollar, pour revenir en quelques mois à 1,35 dollar. Plus que les écarts, c'est la volatilité qui pose des problèmes aux entreprises, notamment aux PME exportatrices ou importatrices qui n'ont pas à leur disposition des outils sophistiqués de couverture de change. Lors des périodes d'euro fort, les entreprises sont tentées par des localisations pluri-régionales (Asie, Amériques, UE) pour atténuer les effets.

### **Raréfaction et hausse de prix des matières premières**

Les cours des matières premières connaissent également des fluctuations importantes, de fréquences et d'amplitudes élevées, ces fluctuations parfois violentes s'inscrivent dans une tendance haussière générale, due d'une part, à une forte augmentation de la demande en provenance notamment des pays émergents, et d'autre part, au caractère limité des ressources de la Terre, notion désormais intégrée par les opérateurs. Les spéculations viennent en outre alimenter la virulence des fluctuations.

Le renchérissement des ressources, pour pénalisant qu'il soit à court terme, tend à orienter les entreprises vers une meilleure gestion : l'optimisation des consommations d'énergie, le recyclage et le changement de matières premières via des technologies alternatives, sont rendus attractifs et économiquement rentables par les hausses de prix des ressources «traditionnelles».

### **Réchauffement climatique et prise de conscience environnementale**

Les effets tangibles du réchauffement climatique ne sont plus guère contestés aujourd'hui, plusieurs indices en attestent :

- augmentation lente, supérieure à 0,6° C en un siècle, des températures moyennes enregistrées par les stations météorologiques du monde entier ;
- diminution de l'étendue et de l'épaisseur de la banquise arctique ;
- recul des glaciers continentaux.

Au sein des pays développés, les disparités de comportement vis-à-vis de l'écologie sont importantes, les couches les plus aisées de la population étant souvent les plus à même de payer plus cher un produit

ou service, ou de procéder à un investissement « écologiquement responsable » (énergies renouvelables, produits de l'agriculture biologique...). Surtout, l'échec de Copenhague a, au moins provisoirement, laissé la seule Union européenne avec des engagements quantitatifs majeurs à long terme de réduction des gaz à effet de serre et d'évolution de ses consommation et production d'énergie.

## Le contexte européen et national

### Développement durable

Le « développement durable », qui, outre cette composante écologique, se préoccupe des aspects sociaux et économiques (durabilité des modèles, équité des échanges), influence de plus en plus les comportements des consommateurs et des entreprises. Depuis quelques années, après une phase de *green washing* (qui tentait de simplement donner une teinte écologique à des produits existants), un véritable marché du développement durable a émergé, créant une véritable économie et de la valeur :

- marchés des crédits carbone, monétarisation du droit à polluer ;
- nouvelles filières dans les énergies renouvelables ;
- gestion des ressources ;
- directives REACH dans le domaine de la chimie.

Les gouvernants et législateurs se sont pour la plupart saisis des enjeux environnementaux. Désormais, pour de nombreux produits, la mise sur le marché nécessite l'engagement de maîtriser la filière de fin de vie, et donc d'être en capacité de structurer la collecte, identifier les composants, en tracer les filières... Basée sur des raisonnements prenant en compte l'impact environnemental évité, la fiscalité permet d'assurer le respect des objectifs par les producteurs. La conséquence en est l'émergence de filières favorisées par la législation qui peuvent être différentes d'un pays à l'autre : combustion, recyclage...

De nouveaux schémas de collecte, de valorisation et de contrôle se mettent en place et génèrent un surcoût pour le consommateur final. De nouvelles recettes dans les filières font évoluer le modèle économique du producteur de « déchets ».

Composants du développement durable, la consommation et l'achat « responsables » se développent, et revêtent des formes diverses, de la part des particuliers comme des entreprises :

- pour les marchés des particuliers, on notera : les achats de produits élaborés selon les principes du « bio », la réduction de la consommation, la prise en compte des allégations de bénéfice pour l'environnement, les achats en cycles courts (proximité), le souci du commerce équitable ;
- concernant les entreprises, les engagements en termes d'éthique, les partenariats avec les fournisseurs, la communication institutionnelle... sont autant de signaux forts anticipateurs d'une évolution à venir des comportements.

### Santé, sécurité et principe de précaution

Phénomène mondial à moyen terme, le vieillissement de la population est particulièrement sensible à court terme dans les pays développés, dont la France. Grâce au progrès de l'hygiène, de la médecine, de la pharmacologie, de l'alimentation, de la maîtrise des risques, l'allongement de la durée de vie est considéré comme un véritable progrès pour la société. Il doit s'accompagner d'une qualité de vie qui ne se réduise pas avec les années. Or, malgré les avancées, il apparaît que de nouvelles pathologies, souvent liées à l'âge, se développent rapidement, à l'instar des maladies neuro-dégénératives. Il y a là des enjeux majeurs en termes de santé publique, ainsi que des défis pour les scientifiques.

L'économie des troisième et quatrième âges se développera dans les prochaines années, notamment à travers les services. En France, à l'âge de la retraite, on constate des départs massifs des grands centres urbains (en particulier l'Île-de-France), puis un retour vers les villes, où la densité de services est plus forte. Selon l'Insee, les personnes âgées de 80 ans et plus constitueront une part croissante de la population métropolitaine en 2030 (7,2 % contre 4,5 % actuellement).

Par ailleurs, la société réclame plus de contrôle et de sécurité :

- le principe de précaution inscrit dans la constitution française et issu des problématiques liées à l'environnement s'applique à de multiples secteurs ;
- la gestion des risques : devenue une activité à part entière dans les entreprises ;
- la traçabilité ;
- la gestion des crises : ESB, grippe A.

Cette attitude impose une évaluation systématique des risques en regard des bénéfices attendus d'une action ou d'un produit.

### **Les technologies de l'information et de la communication (TIC) jouent un rôle essentiel dans la société**

Incontournables pour le fonctionnement et la compétitivité des entreprises, de plus en plus omniprésentes dans la plupart des objets courants, enfouies dans les véhicules et tous les systèmes techniques complexes, les technologies de l'information et de la communication se diffusent dans toutes les composantes de l'économie et dans chaque recoin de notre vie quotidienne. Elles contribuent de façon majeure aux gains de productivité comme à l'innovation, et comme telles, sont une composante essentielle de la croissance. Elles sont aussi le vecteur principal de l'évolution vers la société de la connaissance.

Traitées en tant que secteur économique et par le prisme des technologies clés, les TIC font également partie de notre environnement. Leurs évolutions font naître des espoirs de progrès, tout en soulevant des questions de société fondamentales s'agissant par exemple du respect de la vie privée.

## **Les marchés et les modèles économiques**

### **Des cycles économiques de plus en plus rapides**

Conséquence de la mise en réseau des acteurs économiques mondiaux, et de la circulation accélérée de l'information, les cycles économiques s'enchaînent de plus en plus rapidement :

- les crises et les revirements de situation sont brutaux et fréquents ;
- la morphologie des chaînes de valeur est susceptible d'évoluer rapidement ;
- les entreprises s'adaptent en accélérant le rythme de renouvellement des produits dans tous les secteurs d'activité : électronique grand public, mais aussi automobile, biens d'équipements, pharmacie, agroalimentaire...

Les cycles économiques imposent à l'entreprise de réduire ses temps de développement et de se réorganiser, en interne ou en externalisant certains développements.

### **Des structures de marchés en évolution**

La structuration même des marchés évolue, avec deux tendances, le dédoublement des marchés, et la théorie du *long tail* (longue traîne).

Certains marchés, après s'être essouffés, ont retrouvé un dynamisme en segmentant leur offre en deux axes opposés, le luxe et le *low-cost*. Dans le transport aérien par exemple, le développement fort des compagnies d'avions-taxis est concomitant avec la croissance exceptionnelle de compagnies aériennes à bas coûts qui couvrent de nombreuses destinations, avec des prix très réduits. Certaines entreprises créent des enseignes *low-cost* en leur sein, avec une marque dédiée.

Par ailleurs, les marchés de « niches », longtemps délaissés par les acteurs majeurs, se révèlent comme potentiellement créateurs de valeur, même si les quantités individuelles de chaque produit vendu restent modestes. C'est la théorie *long tail* (longue traîne, d'après l'expression utilisée dans le langage statistique). Grâce à Internet notamment, des modèles diversifiés émergent au rebours de tendances antérieures d'offres uniformisées. Un exemple d'entreprise qui a réussi à s'imposer sur ce marché est le distributeur en ligne Amazon. Grâce notamment aux nouveaux modèles de vente (en ligne) et de stockage (dans des entrepôts peu coûteux loin des centres-ville), le coût d'accès aux niches est parfois très faible. Ainsi les marchés de niches peuvent-ils être très rentables, et une offre abondante de produits uniques ou de petites séries, peut générer autant de chiffre d'affaires qu'un marché de produits populaires ou de commodités.

### Une imbrication de plus en plus forte avec les services

Outre la dynamique des marchés de services qui ne se dément pas, les marchés de produits évoluent aussi, avec des dynamiques propres, vers une offre de services associés. Lorsqu'il achète un produit, le client, qu'il soit particulier, administration ou entreprise, attend un service après vente, une offre de maintenance, un service de mise à jour. Il peut également être attiré par toute offre de services lui « facilitant la vie » et lui permettant de se concentrer sur ses préoccupations essentielles ou son « cœur de métier » pour les entreprises. Les services accompagnant l'offre produit principale sont une source de revenus complémentaires, parfois plus importante que la vente du produit et qui fait la rentabilité. Tous les secteurs économiques sont concernés, les monographies sectorielles du présent ouvrage approfondissent ces aspects.

### L'entreprise s'ouvre et travaille en réseau

De plus en plus, le client participe à l'élaboration du produit et fournit du travail. Cette tendance est particulièrement visible dans le domaine des technologies de l'information et de la communication. Des versions « bêta » des logiciels sont mises en circulation pour que les utilisateurs les testent et signalent à l'éditeur les bugs, le modèle de l'*open source* met à contribution des communautés de développeurs... Loin de ces contributions de personnes éclairées ou de spécialistes, le consommateur fournit aussi un travail, traditionnellement fourni par l'entreprise dans de nombreux cas : les caisses automatiques, l'enregistrement en bornes libre service dans les aéroports, les services bancaires en ligne...

Les démarches d'*open innovation* conduisent les entreprises à aller plus loin que leurs partenariats industriels classiques, et à chercher leurs idées et projets, et plus globalement la valeur, dans l'ensemble de l'environnement qui leur est accessible : clients, fournisseurs, laboratoires... Potentiellement porteuses d'avancées majeures, ces méthodes ont des impacts significatifs sur les modes d'organisation, les processus et les modèles économiques des entreprises.

## Références

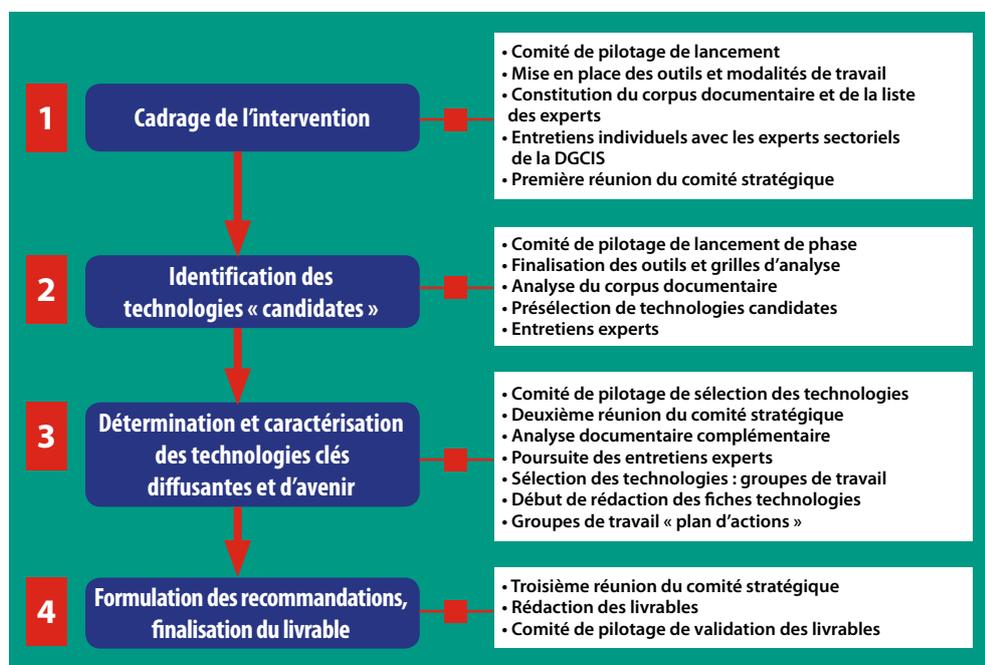
- [1] [http://www.strategie.gouv.fr/article.php3?id\\_article=949](http://www.strategie.gouv.fr/article.php3?id_article=949)
- [2] <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pid20797/la-strategie-nationale-de-recherche-et-d-innovation.html>
- [3] <http://www.etatsgeneraux.industrie.gouv.fr/>

## Méthodologie de réalisation de l'étude

L'étude a été menée de janvier à octobre 2010, par un consortium d'experts et consultants, sous l'égide :

- d'un comité stratégique (composition en annexe), présidé par Denis Ranque, président du Cercle de l'industrie, président de Technicolor, composé de personnalités de l'industrie, de la recherche et de représentants de plusieurs ministères ; ce comité stratégique s'est réuni à trois reprises durant l'étude, respectivement trois, cinq et neuf mois après son démarrage ;
- d'un comité de pilotage (composition en annexe), constitué de représentants des ministères concernés (Industrie, Recherche, Défense, Écologie), de l'Agence nationale de la recherche et d'Oséo ; ce comité de pilotage s'est réuni toutes les six semaines pendant la durée de l'étude ;
- d'une équipe opérationnelle de la DGCIS, qui a assuré le suivi au quotidien de l'avancement des travaux.

Elle s'est déroulée en quatre phases :



### Phase 1 Cadrage

Cette première phase a permis de délimiter le cadre de l'étude, de concevoir et développer les outils et les méthodes mis en œuvre par la suite.

Une série d'entretiens avec les responsables sectoriels de la DGCIS a permis de construire un premier panorama de l'industrie française, tous secteurs d'activité confondus, d'identifier les enjeux et les thématiques prioritaires et de constituer une première liste de technologies à « surveiller ».

### Phase 2 Identification des technologies « candidates »

L'analyse bibliographique et une première série d'entretiens avec des experts ont été au cœur de cette partie des travaux.

Les informations recueillies lors de la première phase ont été complétées grâce à un travail d'analyse documentaire. Les documents recueillis ont été indexés et archivés sur un site intranet dédié à l'étude. Chacun des chapitres de ce document comporte une sélection des références bibliographiques les plus utiles.

Une première série d'entretiens avec des experts reconnus des sciences, des technologies et du développement des entreprises ont permis de mettre en perspective les résultats de cette analyse bibliographique, et de déterminer les technologies « candidates », *i.e.* susceptibles d'être retenues *in fine* comme technologies clés.

### **Phase 3 Détermination et caractérisation des technologies clés**

Sur la base de ces listes de technologies candidates, sept groupes de travail sectoriels, animés par les consultants, et composés des responsables sectoriels de la DGClS et d'experts de l'industrie ou de la recherche académique (composition des groupes en annexe) se sont réunis pour **sélectionner** les technologies clés (diffusantes et d'avenir).

Des entretiens experts complémentaires ont été réalisés, et les pôles de compétitivité consultés.

Une première version des fiches technologies clés et du livrable a été rédigée.

En fin de phase, sept autres groupes de travail se sont réunis, avec pour objectif de **proposer des actions** concrètes à même de favoriser le développement des technologies d'avenir et la diffusion des technologies diffusantes.

### **Phase 4 Formulation des recommandations, finalisation du livrable**

Initiée par la troisième réunion du comité stratégique, cette phase a permis d'enrichir chaque monographie et chaque fiche technologie clé par des recommandations ; ces recommandations sont exprimées par les experts consultés et les consultants qui ont animé les travaux.

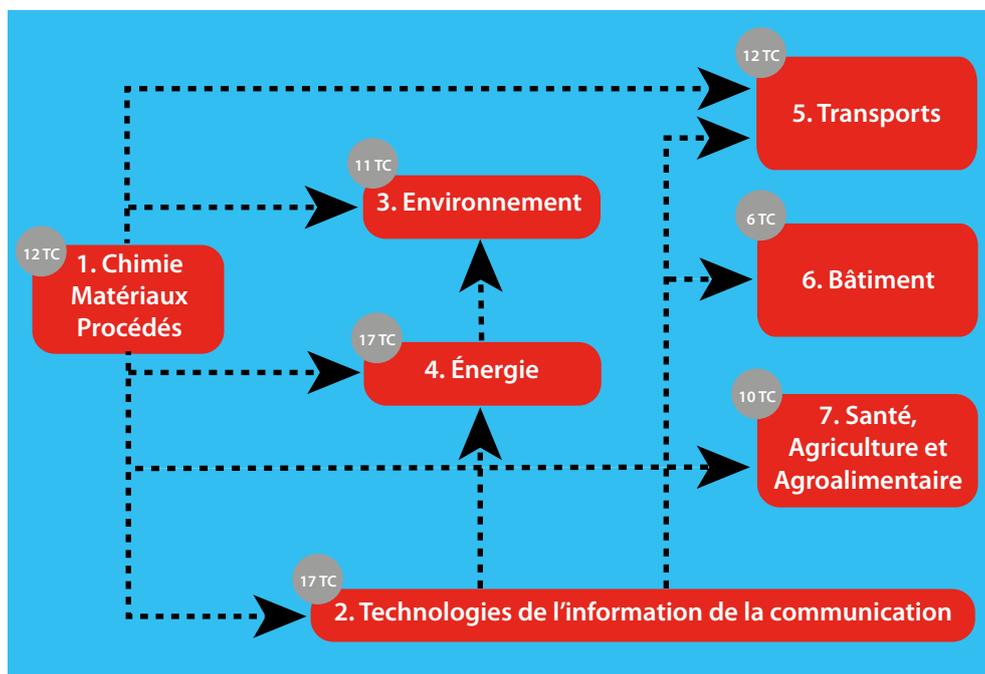
L'ensemble du livrable a été revu, notamment par les membres du comité de pilotage et du comité stratégique, pour en assurer la cohérence et la complétude.

## **Présentation des résultats et utilisation de l'étude**

L'étude couvre tous les secteurs économiques (hors banques et assurances, sauf pour certains aspects liés aux TIC, en particulier). Pour guider la lecture par les utilisateurs de l'étude, une structuration par grands secteurs « technico-économiques » a été opérée :

- Chimie - Matériaux - Procédés.
- TIC (Technologies de l'information et de la communication).
- Environnement.
- Énergie.
- Transports.
- Bâtiment.
- Santé, Agriculture et Agroalimentaire.

Cet ordre de présentation reflète la proximité croissante avec le consommateur final, ainsi que le représente le schéma ci-dessous ; le schéma illustre également le fait que certains secteurs (chimie-matériaux, technologies de l'information et de la communication) irriguent la plupart des autres. En pratique, cet ensemble « fait système », en ce sens que l'innovation naît souvent aux interfaces d'usages simultanés de nombreuses technologies, dont les maîtrises sont conjointement nécessaires.



Chacun de ces secteurs est présenté selon la même structure.

- Une monographie de quelques pages développant une réflexion stratégique sur le secteur considéré :
  - le contexte et les enjeux ;
  - les grandes tendances d'évolution du secteur, et les produits et services qui les desservent ;
  - les tendances technologiques, qui sous-tendent ces produits et services ;
  - une analyse de la position de la France ;
  - des recommandations de portée générale, pour favoriser la diffusion des technologies diffusantes et le développement des technologies d'avenir.
- En tête de chaque monographie figure un schéma :
  - chaque cercle représente une technologie identifiée par son numéro ;
  - le rayon du cercle (trois rayons possibles) donne une indication de l'attrait du marché de la technologie considérée (taille, taux de croissance). **Attention** : les comparaisons entre deux monographies ne sont pas pertinentes sur ce critère d'attrait ;
  - les couleurs renvoient aux enjeux auxquels répond la technologie ;
  - chaque technologie est positionnée horizontalement et verticalement dans le schéma :
    - l'axe horizontal indique l'horizon temporel d'accès au marché pour la technologie ;
    - l'axe vertical précise la position de la France dans la compétition internationale.

# Une collection de fiches technologies clés, chaque fiche ayant la même structure :

Caractère diffusant ou d'avenir de la technologie



Applications de la technologie et éclairages sur les marchés correspondants

## 77. Ingénierie génomique

### Définitions

L'ingénierie génomique repose sur des disciplines fondamentales abordant les problèmes de base de l'organisation, de la stabilité et de la variation du matériel génétique, de la réplication et de la réparation de l'ADN, ainsi que de la régulation de l'expression et de l'évolution des génomes et enfin la génomique des populations. L'étude de la régulation de l'expression des gènes et des contrôles épigénétiques, omniprésents dans le monde du vivant, représente un enjeu important pour comprendre les fonctions moléculaires de la physiologie cellulaire, la relation génotype-phénotype et les liens entre gènes, environnement et santé.

L'ingénierie génomique trouve de multiples applications, fait appel à des technologies de vectorisation et requiert la présence d'outils puissants d'acquisition et de traitement des données. Elle doit également pouvoir bénéficier du développement des nouvelles techniques d'imagerie.

### Description

Le génome peut être manipulé afin de faire pénétrer un ou plusieurs gènes d'intérêt dans les cellules ou les tissus d'un organisme vivant. Le gène peut être introduit selon deux méthodes : *in vivo* et *ex vivo*. Dans la méthode *in vivo*, le gène est directement introduit. Dans la méthode *ex vivo*, les cellules ciblées sont d'abord prélevées puis modifiées génétiquement par l'introduction du gène avant d'être ré-administrées au sein de l'organisme.

De nouvelles recherches sont aujourd'hui développées et reposent, en plus de l'ADN, sur des petits ARN interférents (ARNi). Cette technique de ciblage cellulaire des ARNi permet le blocage des ARN messagers (ARNm) par les ARNi et ainsi la correction du dysfonctionnement d'une protéine.

La transgénèse correspond à la modification du génome d'un organisme par génie génétique. Elle peut être réalisée au niveau de micro-organismes, de cellules de plantes ou d'animaux et résulte en un organisme génétiquement modifié.

Le transfert de gènes et la vectorisation sont clés dans la maîtrise de l'ingénierie génomique. Les gènes sont introduits au moyen de vecteurs viraux – vecteurs rétroviraux, adénoviraux ou issus de virus associés aux adénovirus (AAV) par exemple – ou non viraux – plasmides ou vecteurs lipidiques par exemple.

Des verrous technologiques subsistent. Ainsi, malgré les récentes avancées scientifiques, l'insertion du gène n'est pas encore complètement maîtrisée ; pour cela, une meilleure connaissance des voies d'insertion des vecteurs et de la localisation dans le génome du gène introduit est indispensable. Le transfert de gènes doit également être assuré de manière sûre et efficace et garantir la stabilité de l'expression du gène introduit. Par ailleurs, la transgénèse était réalisée jusqu'à présent de manière aléatoire ; l'enjeu est de cibler des modifications très précises. Les nouvelles générations de séquenceurs constituent des outils précieux pour cela.

### Applications

L'ingénierie génomique trouve de nombreuses applications en agronomie et agroalimentaire. L'enjeu est de répondre aux besoins en termes d'agriculture durable, en développant des variétés requérant moins d'eau et de pesticides, et davantage résistants aux conditions de culture. Il s'agit d'organismes génétiquement modifiés (OGM). La superficie mondiale des cultures génétiquement modifiées est de 134 millions d'hectares en 2009 et devrait croître à 200 millions d'hectares d'ici à 2015 (sur 40 pays) [38].

Sans aller jusqu'aux OGM, l'ingénierie génomique permet également de sélectionner des variétés animales ou végétales présentant des caractéristiques agronomiques d'intérêt. Elle permet également de combiner dans une même souche de bactéries ou de levures les gènes permettant de produire les enzymes capables de transformer la cellulose en éthanol, pour la production de bio-carburants à partir des restes des cultures.

En santé, les pathologies concernées par l'ingénierie génomique sont nombreuses. Les avancées en ingénierie génomique permettent notamment le développement de la thérapie génique. En juin 2010, 1 644 essais cliniques sont en cours dans le monde. La grande majorité de ces essais est en phase I (60,5 %) ; seuls 3,5 % sont en phase III [36]. Le marché mondial de la thérapie génique est estimé à 484 M\$ en 2015 [37]. En avril 2010, aucun produit de thérapie génique n'a encore été approuvé par la Food and Drug Administration (FDA).

En modifiant le génome de certaines espèces animales, il est également possible de produire des biothérapies (par exemple à partir de lapins génétiquement modifiés). Enfin, l'ingénierie génomique est porteuse de services à très haute valeur ajoutée, notamment au travers du séquençage du génome basé sur les nouvelles générations de séquenceurs, mais aussi de services de caractérisation de l'impact et de contrôle qualité de la chirurgie génomique (à l'image des sociétés de service de type immunomonitoring).

### Enjeux et impacts

Les enjeux sont tout d'abord médicaux. Le spectre des maladies concernées par la thérapie génique est très large et la thérapie génique favorise le développement de nouveaux traitements médicaux et en particulier de solutions pour certaines maladies incurables à l'heure actuelle (telles que des maladies orphelines). En revanche, si les essais sur les animaux sont porteurs d'espoir, le passage de l'animal à l'homme demande des financements importants et une organisation adaptée.

Il faut également noter des enjeux de durabilité, soit par l'obtention de variétés adaptées aux conditions climatiques et nécessitant moins d'intrants, soit l'obtention de produits autrement qu'à partir de pétrole.

Enfin, les questions éthiques et sociales sont très importantes. Le Comité consultatif national d'éthique (CCNE) s'est exprimé à plusieurs reprises sur la thérapie génique et préconise de limiter les recherches aux seules cellules somatiques et d'exclure les cellules germinales. La société française est également très réfractaire à l'idée de consommer des produits issus d'OGM.

Indicateurs sur la diffusion et la maturité de la technologie

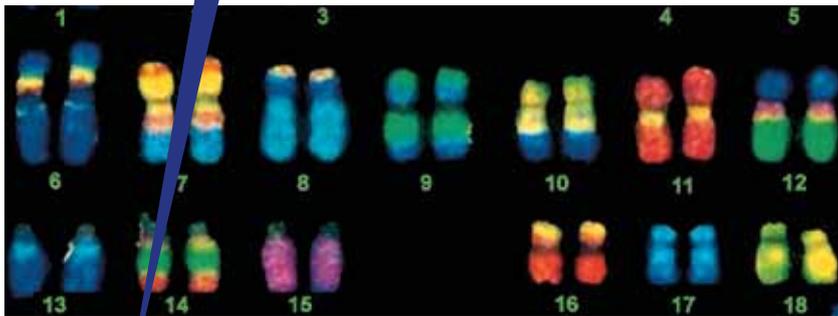
Degré de diffusion dans l'absolu	
<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

Degré de diffusion en France	
<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

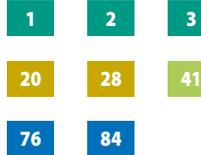
Enjeux et impacts attendus de la technologie

## Santé, Agriculture et Agroalimentaire

Les principaux acteurs français et étrangers (R&D, intégrateurs, industriels, utilisateurs, structures relais



Liens avec d'autres technologies clés



Liens vers les autres technologies clés reliées

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

- **R&D** : Généthon, Inserm (LTG, UTGC Nantes), Institut Pasteur Université Paris Descartes (Département de biothérapie), Transgene
- **Industriels** : Cayla, Collectis, Clean Cells, Genopoiétic, Genosafe, In-Cell-Art, PrimeBiotech
- **Utilisateurs** : Hôpital Necker, Sanofi-Aventis, Limagrain
- **Structures relais** : AFM, Alsace BioValley, Lyonbiopôle, Medicen

#### Principaux acteurs étrangers

- Avigen, Cell Genesys, Introgen Therapeutics, Genvec, Genzyme Corporation, Pioneer HiBred International, Targeted Genetics Corp, Urigen Pharmaceuticals Inc., Vical (Etats-Unis), Gene Signal (Suisse), AnGes MG (Japon), Oxford BioMedica (Royaume-Uni), Shenzhen SiBiono GeneTech Co., Ltd (China)

### Position relative de la France

La France possède une bonne position en recherche avec la présence de plusieurs centres de recherche de pointe en génétique et génomique. En 1999, la France a d'ailleurs été le premier pays à tenter de soigner des bébés privés de défenses immunitaires, dits « bébés-bulles » grâce à la thérapie génique. Des entreprises telles que Transgene ou Collectis se distinguent à un niveau international.

Au niveau des essais cliniques, les États-Unis sont le pays leader et réalisent 62,9 % des essais cliniques en thérapie génique dans le monde. La France, avec 44 essais cliniques en cours – soit 2,7 % – se situe en cinquième position, derrière le Royaume-Uni (11,9 %), l'Allemagne (4,8 %) et la Suisse (2,9 %) [36]. Concernant les applications environnementales et agroalimentaires, la France

est en retard, tant sur la production de biocarburants que sur le recours aux OGM. Ce retard est en grande partie dû aux véritables difficultés d'acceptabilité sociétale.

### Analyse AFOM

#### Atouts

Compétences présentes (centres de recherche de pointe); des industriels de niveau international; force de l'AFM.

#### Faiblesses

Règlementation; faibles investissements; dimensions sociales et éthique; peu de centres de production de vecteurs significatifs.

#### Opportunités

Large spectre d'applications; résultats positifs de certains essais cliniques.

#### Menaces

Forte concurrence internationale, notamment des États-Unis; éthique.

Conditions de développement ou de diffusion et recommandations aux pouvoirs publics

#### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

#### Position de la France

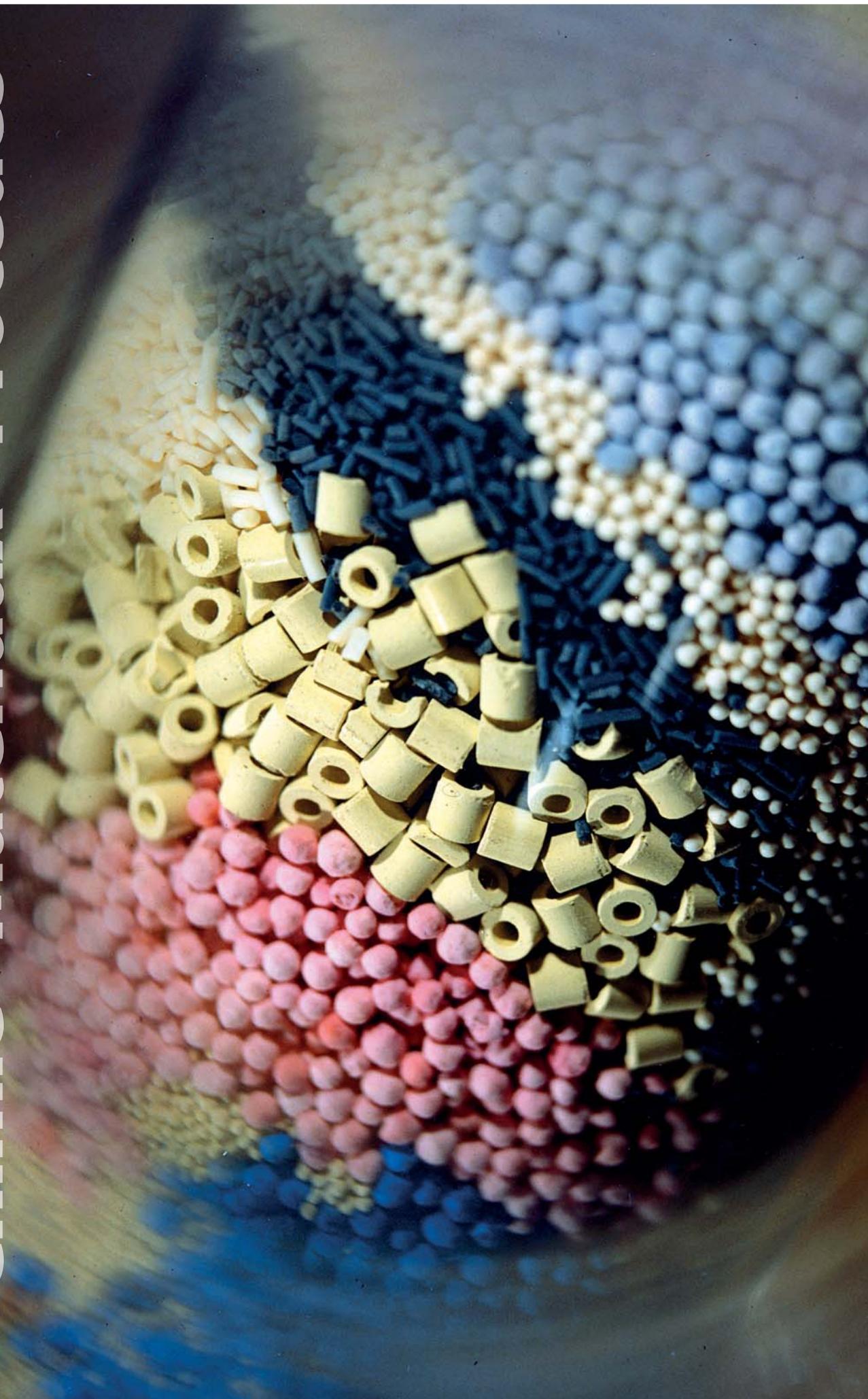
● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

#### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort

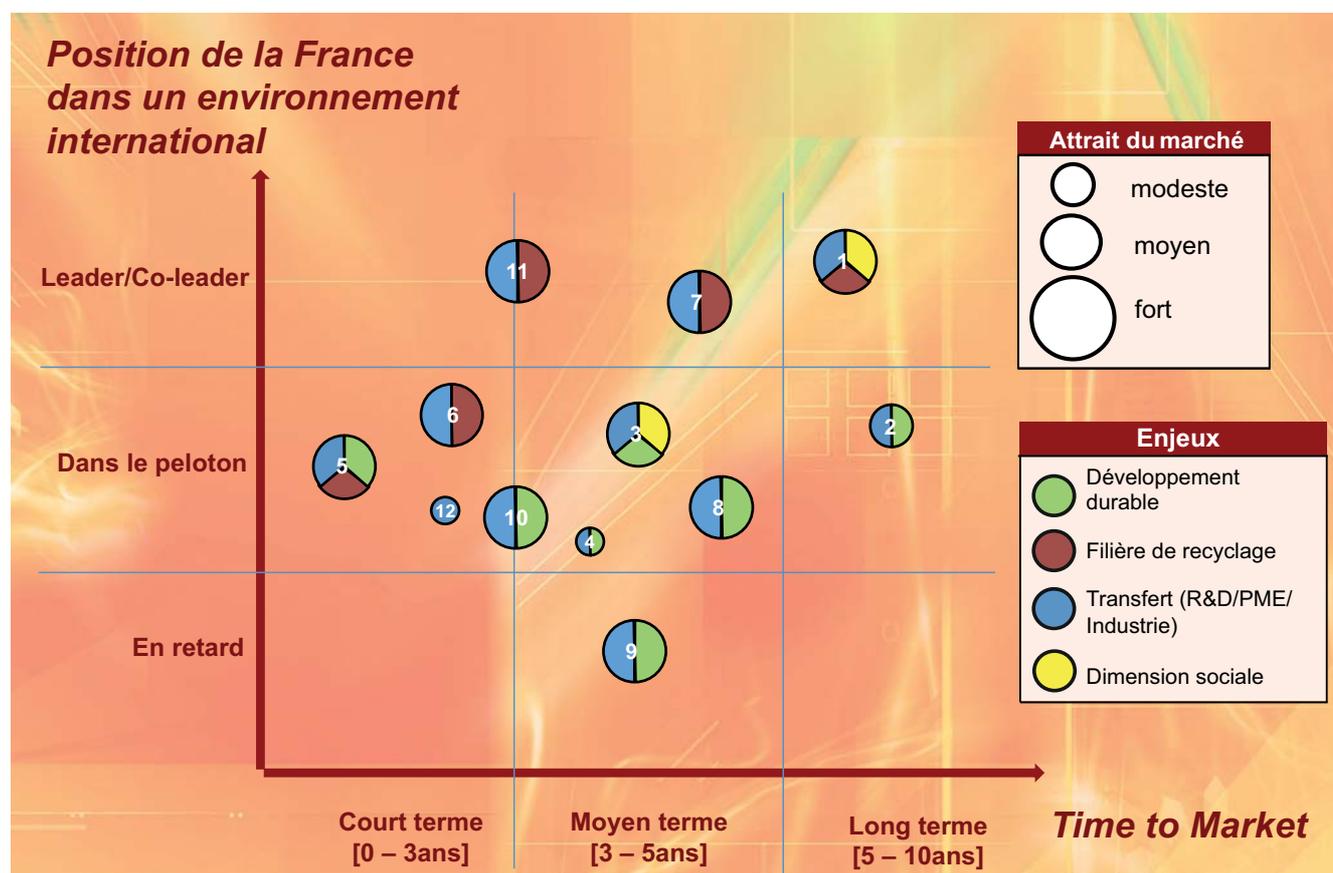
Analyse de la position de la France sur le développement et la diffusion de la technologie

# Chimie - Matériaux - Procédés



# Chimie - Matériaux - Procédés

1. Nanomatériaux
2. Simulation moléculaire
3. Biotechnologies blanches
4. Microstructuration
5. Catalyse
6. Dépôt de couche mince
7. Matériaux fonctionnels, intelligents et de performance
8. Capteurs
9. Procédés membranaires
10. Fabrication rapide
11. Élaboration de composites - Assemblages multimatériaux
12. Contrôle non destructif



## Contexte et enjeux

La chimie, les matériaux, et les procédés qui leur sont associés, sont un champ vaste et hétérogène se positionnant entre matières premières et marchés d'applications industriels. Jusqu'à présent, ce positionnement « intermédiaire » a conduit à un déficit d'image fort dans la mesure où les produits associés sont rarement visibles du grand public. Pourtant ce secteur alimente les développements et les innovations du monde qui nous entoure que ce soit dans le domaine du transport ou médical, de l'énergie ou de l'environnement...

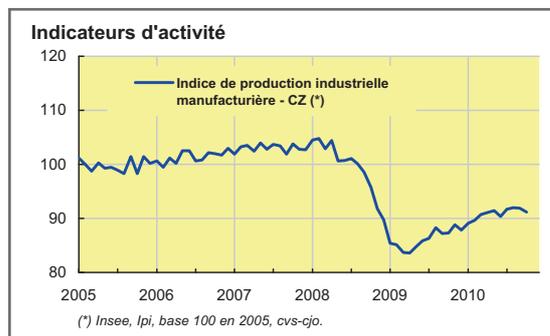
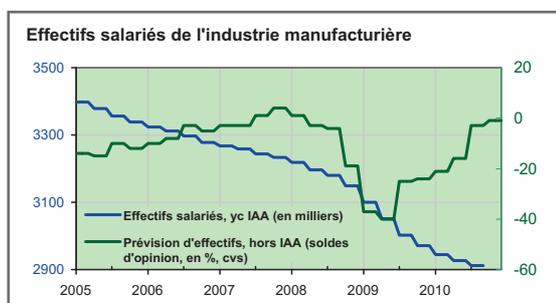
Ce secteur rassemble quatre familles principales : matériaux métalliques et transformation des métaux ; produits minéraux non métalliques ; chimie, caoutchouc et plastiques ; papier et bois. Remarque : seules les familles des biens intermédiaires sont prises en compte (nomenclature statistique). Les biens de consommations, eux, ne le sont pas.

## Une place prépondérante dans notre économie

En 2010 (selon Tableau de bord mensuel de l'activité industrielle, décembre 2010, DGCIIS), ces industries représentaient un chiffre d'affaires de 241 milliards d'euros.

Sur la scène internationale, la chimie est en 2009 le premier secteur exportateur avec 13,4 % des exportations de l'industrie manufacturière. Par son excédent commercial de 5,1 milliards d'euros, elle est positionnée au troisième rang des secteurs industriels derrière l'industrie aéronautique et spatiale et la fabrication de médicaments.

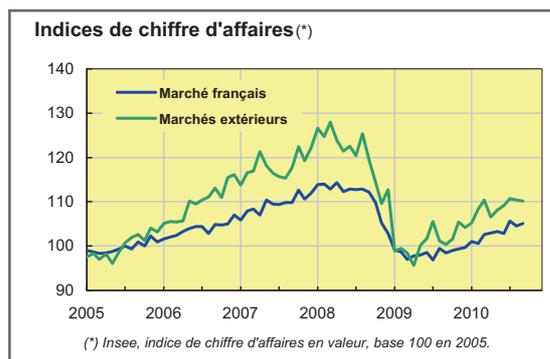
En 2009* En 2010**	CA* HT Md€	Salariés** milliers
Matériaux métalliques et transformation des métaux	78,1	387,2
Matériaux minéraux, caoutchouc, plastiques	58,9	292,7
Chimie	63,8	149,5
Bois et papier	39,8	251,3
<b>Total</b>	<b>240,6</b>	<b>1 044,7</b>



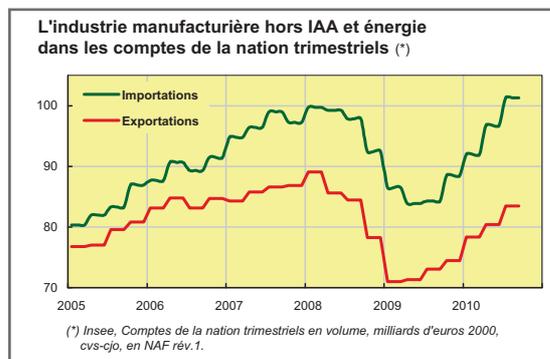
## Un secteur qui souffre économiquement...

De 2008 à 2009, on note une forte baisse de la production des biens intermédiaires avec une diminution de 15,7 %. L'année 2010 fera apparaître malgré tout une reprise sensible.

Sur la dernière décennie, la production 2009 de l'industrie chimique a reculé de 0,2 % par rapport à 1999 et de 7,3 % si on ajoute la chimie fine pharmaceutique.



Ces faibles performances masquent de nombreuses restructurations et cessations d'activités dans le domaine de la chimie de base et de la chimie fine pharmaceutique. Par ailleurs, d'importants efforts de productivité ont conduit à une perte d'emploi de 2,4 % par an sur cette période.



## ... et qui doit faire face à des pressions réglementaires de plus en plus fortes

Depuis une dizaine d'années maintenant la pression réglementaire sur le secteur de la chimie et des matériaux s'est fortement accrue (directive biocide, règlement REACH, système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques...). Cette pression est d'autant plus forte que l'application de ces réglementations en France est parfois plus exigeante que les réglementations européennes. Il n'est pas question de remettre en cause ces démarches qui vont dans le sens d'un plus grand respect de l'environnement et d'une plus grande sécurité, mais il faut tout particulièrement veiller à ce que l'ensemble de ces réglementations ne soit pas un frein au maintien de la compétitivité de notre tissu industriel dans un environnement international très compétitif.

En particulier, l'entrée en vigueur de REACH aura des répercussions fortes sur le secteur de la chimie et des matériaux et sur ses marchés d'applications en introduisant des logiques de substitution de substances. En effet, dans le cadre de REACH, les producteurs ou importateurs de substances devront procéder à des enregistrements. Sans enregistrement, ils ne pourront plus mettre leurs substances sur le marché impliquant, pour l'aval du marché, des recherches de substituts. Cette démarche de substitution sera directement mise en place pour les substances chimiques les plus dangereuses (en particulier les substances CMR).

## Une nécessité d'innover pour rester dans la course

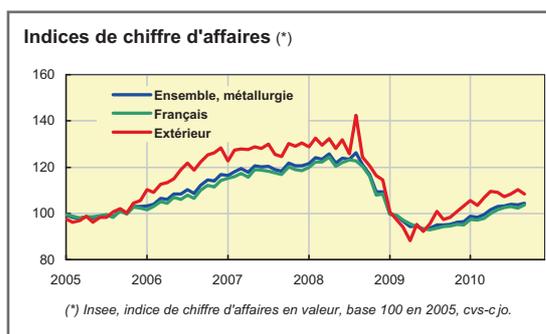
Par sa position « intermédiaire », le secteur de la chimie et des matériaux se doit d'innover fortement pour continuer à soutenir ses secteurs d'applications qui sont aujourd'hui en pleine mutation (allègement dans l'automobile, efficacité énergétique dans le bâtiment, nouveaux matériaux pour les énergies renouvelables...). Cette course à l'innovation est également une condition *sine qua non* pour rester en pointe dans un secteur où la concurrence internationale est très forte.

Enfin, même si ce secteur est source d'une partie des atteintes environnementales de l'industrie, c'est aussi en son sein que sont et seront développées la plupart des solutions technologiques amont (notamment par l'innovation sur des produits et procédés plus respectueux de l'environnement et plus sobres en matières premières et en énergie, par l'intégration du recyclage) permettant un développement durable des filières aval.

### Matériaux métalliques et transformation des métaux

En 2009* En 2010**	CA* HT Md€	Salariés** milliers
Sidérurgie	17,8	-
Métaux non ferreux	8,5	-
Fonderie	4,0	-
Travail des métaux	36,7	-
Produits métalliques	11,2	-
<b>Total</b>	<b>78,1</b>	<b>387,2</b>

(\*) Insee, estimations DGIS (\*\*) Insee, Dares



Ce secteur rassemble les entreprises de la sidérurgie, de la fonderie, du travail des métaux ferreux et non ferreux et de la production de produits métalliques.

En 2009, le secteur des matériaux métalliques et de transformation des métaux réalise un chiffre d'affaires de 78,1 milliards d'euros et emploie un total de 387 200 personnes.

L'ensemble des productions françaises d'acier, des métaux non ferreux et des produits métalliques, en forte baisse sur l'année 2008 repart à la hausse en 2010. Ce recul de la production est dû notamment aux difficultés rencontrées par les secteurs de l'automobile et du BTP. Concernant la sidérurgie en particulier, la chute de la production provient également des choix d'Arcelor-Mittal le leader mondial. En effet, celui-ci a décidé de réduire sa production mondiale de 30 à 35 % afin d'éviter la constitution de stocks et une chute trop forte des prix de l'acier (- 12 % fin 2008).

### Les enjeux de ce secteur

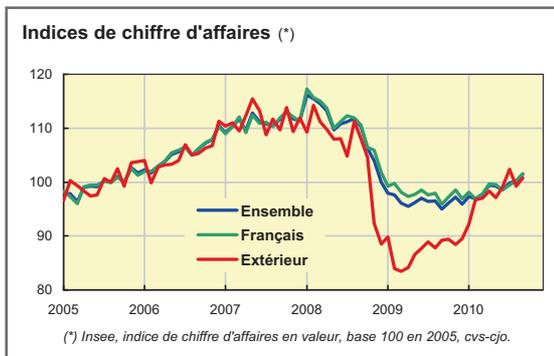
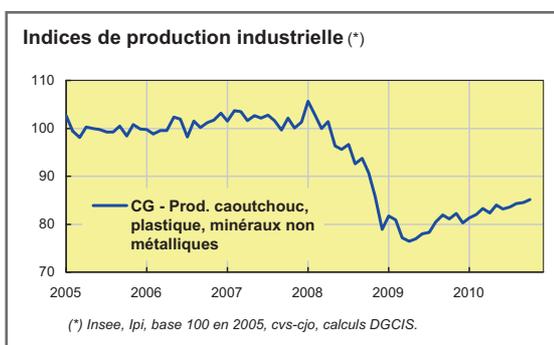
**Diminution des dépenses énergétiques :** les métaux sont bien évidemment concernés par la problématique développement durable. Sur ce dernier point, les aspects liés aux réductions de consommations énergétiques et aux émissions de gaz à effet de serre concernent aussi bien la production des métaux et des produits métalliques que leurs usages (notamment dans les moyens de transport).

**Augmentation de la performance et nouvelles fonctionnalités :** ce secteur doit faire face à la fois à des exigences toujours plus élevées en matière de coût/performance et à des besoins de nouvelles fonctionnalités (antibactérien, légèreté, résistance à la corrosion...).

**Gestion de la ressource :** le secteur des métaux est confronté à de très importantes variations au niveau de la demande créant de fortes tensions sur les marchés (acier, cuivre, métaux nobles). Cela favorise le développement de nouvelles solutions moins consommatrices en matières premières (couches minces, alliages...).

### Produits en caoutchouc et en plastique, produits minéraux non métalliques

En 2009* En 2010**	CA* HT Md€	Salariés** milliers
Produits en caoutchouc et en plastique, produits minéraux non métalliques		292,7
Fabrication de produits en caoutchouc	8,6	-
Fabrication de produits en plastique	24,4	-
Fabrication de verre et d'articles en verre	6,2	-
Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques hors verre	19,6	-
<b>Total</b>	<b>58,9</b>	<b>292,7</b>



Les industries du secteur produits en caoutchouc et en plastique, produits minéraux non métalliques emploient en 2009 292 700 personnes pour un chiffre d'affaires de 58,9 milliards d'euros.

On retrouve dans les matériaux minéraux non métalliques l'ensemble des produits de carrières, des produits en verre et en céramique, et les matériaux de construction.

Sur l'année 2008, les industries du verre, des céramiques et matériaux de construction sont en net recul. La production industrielle diminue effectivement de 12,4 % pour le verre et de 14,5 % pour les matériaux de construction et les céramiques. Ce repli provient essentiellement du fléchissement des secteurs du bâtiment, des travaux publics et de la construction automobile. Un facteur supplémentaire de difficulté pour les matériaux de construction est la hausse des prix de l'énergie et du métal. Pour les céramiques en particulier, le déficit commercial s'est creusé en raison d'une forte concurrence des pays asiatiques. Les industries du caoutchouc et du plastique n'ont pas échappé à la crise avec une forte baisse de leur activité. La parachimie et l'industrie du caoutchouc ont pâti du ralentissement de l'industrie automobile et de l'industrie manufacturière. Quand aux plasturgistes, l'augmentation en 2008 des coûts des matières premières pétrochimiques a réduit leur marge.

#### Les enjeux de ce secteur

Les principaux enjeux de ce secteur consistent à développer une approche durable reposant sur :

- l'anticipation des impacts environnementaux et sanitaires de ces produits ;
- la limitation de l'empreinte environnementale des procédés (diminution de la facture énergétique, recyclage, utilisation de ressources renouvelables) ;
- l'anticipation des innovations en proposant des matériaux hautes performances pour faire face à la montée en puissance d'une concurrence étrangère omniprésente.

**Amélioration des performances / matériaux intelligents et performants :** les minéraux non métalliques participent aujourd'hui à deux grandes tendances du marché :

- par le développement de nouvelles solutions techniques (béton, verre, isolant), ces matériaux participent directement à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments comme imposé par le Grenelle de l'environnement ;
- par ailleurs, les matériaux minéraux non métalliques doivent faire face aux exigences techniques de durabilité, de performances améliorées et de recherche de nouvelles fonctionnalités imposées par les secteurs utilisateurs.

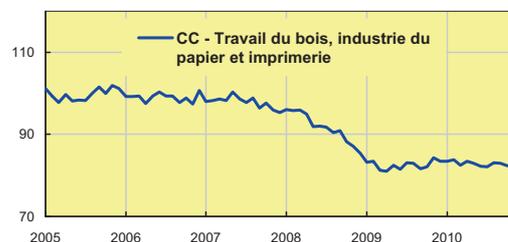
**Diminution des dépenses énergétiques :** cette industrie de transformation des minéraux nécessite un apport énergétique conséquent (cimenterie, verrerie). Un effort important est engagé à la fois sur la réduction de la facture énergétique et sur la valorisation des émissions de CO<sub>2</sub>.



## Industrie chimique

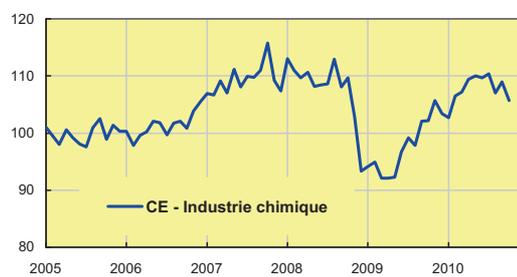
En 2009*	CA*	Salariés**
En 2010**	HT Md€	milliers
Produits chimiques, parfums et cosmétiques		149,5
Produits chimiques de base, azotés et d'engrais, de matières plastiques de base et de caoutchouc synthétique	32,3	-
Savons, produits d'entretien et parfums	17,4	-
Autres produits chimiques et fibres artificielles ou synthétiques	14,0	-
<b>Total</b>	<b>63,8</b>	<b>149,5</b>

## Indices de production industrielle (\*)



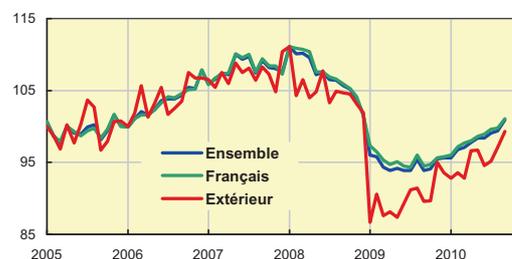
(\*) Insee, Ipi, base 100 en 2005, cvs-cjo, calculs DGCIS.

## Indices de production industrielle (\*)



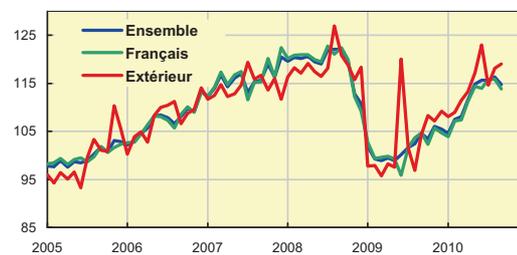
(\*) Insee, Ipi, base 100 en 2005, cvs-cjo, calculs DGCIS.

## Indices de chiffre d'affaires (\*)



(\*) Insee, indice de chiffre d'affaires en valeur, base 100 en 2005, cvs-cjo.

## Indices de chiffre d'affaires (\*)



(\*) Insee, indice de chiffre d'affaires en valeur, base 100 en 2005, cvs-cjo.

Cette partie rassemble les produits de la chimie de base, produits chimiques, parfums et cosmétiques. Ces secteurs ont un chiffre d'affaires total de 63,8 milliards d'euros (2009) et emploient près de 149 500 salariés en 2010.

## Travail du bois, industries du papier et imprimerie

En 2009*	CA*	Salariés**
En 2010**	HT Md€	milliers
Travail du bois, industries du papier et imprimerie		215,3
Articles en bois et en liège, sauf meubles ; articles en vannerie et sparterie	10,5	-
Pâte à papier, de papier et de carton	6,8	-
Articles en papier ou en carton	10,7	-
Imprimerie et reproduction d'enreg.	11,8	-
<b>Total</b>	<b>39,8</b>	<b>215,3</b>

Ce secteur rassemble les industries produisant des articles en papier, bois et le secteur imprimerie. Les activités principales effectuées par ces entreprises sont la fabrication de charpentes et de menuiseries, la production de panneaux et la réalisation d'emballages.

La plupart des installations industrielles de production de pâte et de papier appartiennent à des groupes internationaux étrangers. Le secteur travail du bois, industries du papier et imprimeries emploie 215 300 salariés en 2010 et réalise un chiffre d'affaires de 39,8 Md€. Le secteur a été victime (entre 2007 et 2010) du repli de la consommation et de la hausse des coûts de production. Des diminutions de production entre 20 % et 12 % selon les sous-secteurs, ont été enregistrées avant de se stabiliser.

## Les enjeux de ce secteur

Dans un marché du papier mondial concentré et fortement concurrentiel, l'objectif principal est de maintenir sa compétitivité. Cela passe en partie aujourd'hui par deux axes :

- **amélioration des procédés** : l'objectif est de développer des procédés plus économes en eau et en énergie ;
- **optimisation et diversification de l'usage de la ressource bois** : cela passe par un élargissement de la ressource utilisable (utilisation des déchets, recyclage).

## Les grandes tendances d'évolution du secteur

Comme on a pu le voir dans les paragraphes précédents, le secteur de la chimie et des matériaux représente un ensemble de produits et de marchés d'applications très différents, chacun fonctionnant avec ses propres règles et contraintes. Pourtant, il est important de souligner ici que ce secteur connaît aujourd'hui une véritable mutation qui conduit à trois grandes tendances d'évolution :

- se préparer à la raréfaction des ressources : ce premier enjeu passe à la fois par le développement de procédés économes en énergie et par l'intégration des bioressources ;
- améliorer et sécuriser ses procédés : ce deuxième enjeu passe aussi bien par l'optimisation et le développement de procédés plus propres et sécurisés que par la prise en compte de la notion du recyclage ;
- s'affirmer comme un interlocuteur clé : ce dernier enjeu nécessite à la fois d'identifier les « filières aval » prometteuses et de mieux comprendre leurs besoins afin de s'intégrer dans les développements de rupture de ses clients.

### Se préparer à la raréfaction des ressources

L'industrie chimique reste fortement dépendante des ressources non renouvelables.

L'industrie chimique en France consomme environ 40 % du gaz naturel de l'industrie et 25 % de l'énergie électrique. Ces produits chimiques sont issus à 60 % de ressources fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon).

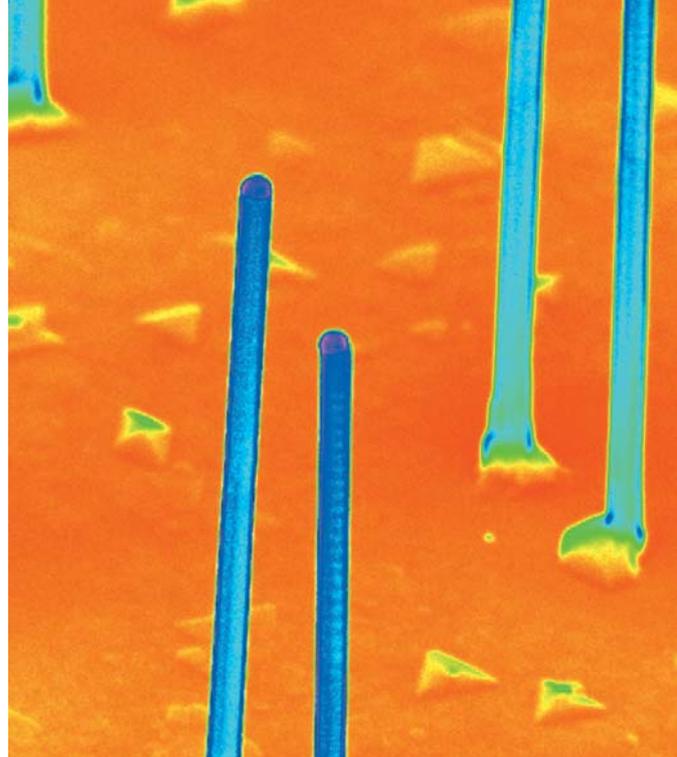
Actuellement, les préoccupations socio-économiques et écologiques poussent au développement de solutions alternatives pour limiter cette dépendance aux ressources fossiles.

Cette tendance se traduit par une volonté déjà bien engagée des industriels de la chimie et des matériaux à promouvoir des procédés de production plus économes en énergie en intégrant très en amont ce critère dans le cahier des charges des développements produits.

Ce mouvement se transpose également par la volonté de promouvoir des ressources en matières premières alternatives (bioressources). Ce mouvement est d'ailleurs particulièrement marqué au niveau européen puisque l'Union européenne fixe à horizon 2020 un objectif de 15 % de toutes les productions chimiques à partir de procédés biotechnologiques (ressource biomasse).

### Améliorer et sécuriser ses procédés

Le secteur de la chimie et des matériaux souffre d'un déficit global de visibilité au niveau de la société française (image négative liée aux incidents industriels, mauvaise image environnementale, intérêt peu marqué des jeunes diplômés). Cependant, dans le contexte actuel du développement durable, cette industrie peut contribuer significativement à améliorer son empreinte « envi-



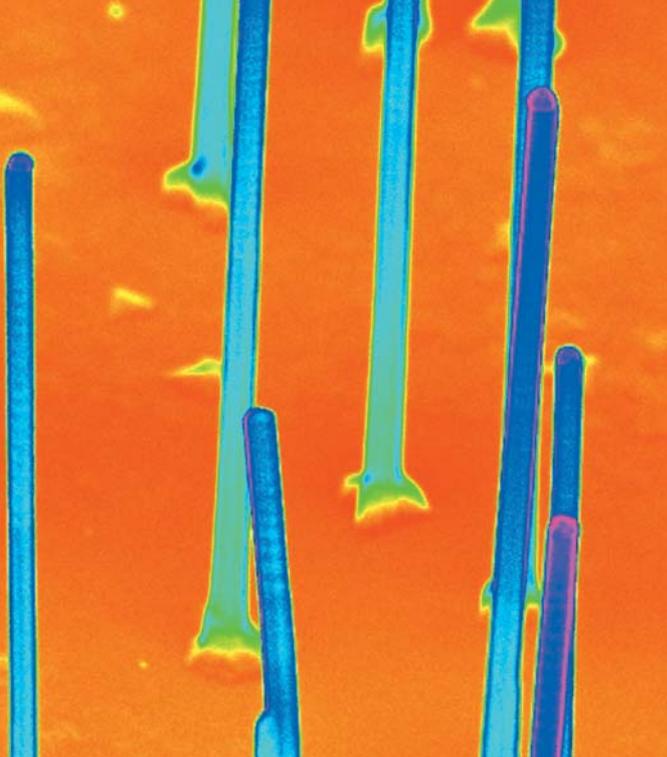
ronnementale » en jouant notamment sur trois leviers principaux. Le premier levier concerne l'amélioration et l'optimisation des procédés existants. Dans ce domaine, les évolutions attendues concernent la mise en place de procédés plus efficaces (meilleur rendement, sélectivité...) permettant une réduction de la taille des installations, une diminution des quantités de réactifs, de solvants ou d'eau utilisée ainsi qu'une réduction des rejets (gazeux, solides, liquides) dans l'écosystème. Cela passe aussi par un meilleur contrôle des conditions de réactions (abaissement des conditions réactionnelles, réduction des volumes de réacteurs) ouvrant des perspectives de procédés plus sûrs.

Le deuxième levier aborde l'intégration de nouvelles technologies de dépollution et/ou le développement de nouveaux procédés plus respectueux de l'environnement. Ces développements présentent le double avantage d'apporter des réponses pertinentes aux exigences réglementaires environnementales toujours plus contraignantes tout en conservant une compétitivité économique.

Le troisième levier est la prise en compte du recyclage. Ce thème est l'une des priorités du Grenelle de l'environnement. Au-delà des développements de nouvelles filières (recyclage des plastiques, recyclage des métaux...) et de nouvelles voies de recyclage, le secteur de la chimie et des matériaux peut intervenir également à différents niveaux en :

- développant une offre complète de produits « biodégradables » (matières premières, additifs, solvants...);
- réalisant des procédés de recyclage permettant une meilleure réutilisation des matériaux ;
- en participant et/ou en développant des outils d'éco-conception ;
- en prenant en compte, dès la conception des produits, la composante recyclage au même titre que les performances des matériaux.

Si l'on peut considérer que les deux premiers leviers s'inscrivent dans une évolution continue du secteur de la chimie et des matériaux, il apparaît clairement que le troisième levier est une rupture. Ce sujet complexe nécessite une approche globale de la production jusqu'à la fin de vie du matériau. Cette démarche est encore aujourd'hui complexe à mettre en place car impliquant à la fois les acteurs de la chimie mais aussi d'autres acteurs comme ceux notamment de la filière environnement.



## S'affirmer comme un interlocuteur clé : développer la dimension service

Depuis toujours, le secteur de la chimie et des matériaux est intimement lié aux développements de ses marchés d'applications. Jusqu'à présent fournisseur de produits intermédiaires, son enjeu aujourd'hui est de travailler sur l'intégration « aval » pour passer progressivement de ce statut de fournisseur à un statut de développeur de solutions.

Cette tendance doit permettre de mieux capter la valeur en comprenant mieux les besoins des clients. Cette évolution ouvre de profondes modifications au niveau de l'offre que pourront proposer les industriels de la chimie et des matériaux :

- soit en proposant directement de nouveaux produits de hautes performances à l'origine de rupture ;
- soit en travaillant sur la conception même d'une solution en partenariat avec le client. En travaillant sur la conception, ce n'est plus un produit qui est proposé mais une fonctionnalité. De « fournisseur de produits », le chimiste passe à « fournisseur de solution globale », associant produit et service (conception de produits sur mesure, logistique, ingénierie, etc.).

Dans ce contexte, l'offre de service va se développer plus fortement dans ce secteur où elle est encore très limitée. En particulier, les technologies d'aide à la conception (prototypage rapide, simulation moléculaire, contrôle non destructif), de développement de solutions « sur mesure » (dépôt de couche mince, catalyse) vont prendre de plus en plus d'importance dans les prochaines années car pour le client final, elles sont la garantie de performance et de gain en productivité.

## Les tendances technologiques et les technologies clés

Dans le travail d'identification des technologies clés, l'accent a été mis sur le croisement toujours plus important des différentes disciplines, avec la mise en avant des synergies porteuses entre la chimie, les matériaux et les procédés.

Tout naturellement, des technologies transversales comme les nanotechnologies ont pris une place de choix dans cette démarche. Il est cependant important de préciser ici que le fait qu'elles soient traitées dans cette partie ne doit pas minimiser les apports des nanotechnologies dans d'autres secteurs comme les sciences de la vie et l'électronique. L'atteinte des promesses liées aux nanotechnologies passera inévitablement par la convergence de différentes disciplines qui jusqu'à présent n'ont pas été naturellement associées (chimie, physique, biologie, ingénierie). En ce sens, les nanotechnologies sont véritablement une technologie clé transversale.

Au-delà des nanotechnologies, les tendances technologiques qui sous-tendent le développement de la chimie, des matériaux et des procédés ne sont plus nécessairement liées à la nature des matériaux mais aux fonctions et aux solutions que ces technologies apportent. En conséquence, on ne parlera pas directement de matériaux céramiques, de métaux ou de verres mais de matériaux fonctionnels et intelligents, de fonctionnalisation par dépôt de couche mince, etc.

L'ensemble des enjeux de la chimie, des matériaux et des procédés peuvent être regroupés en trois grandes tendances technologiques :

- les technologies « durables » : il s'agit de technologies permettant soit une maîtrise de sa propre empreinte environnementale conduisant à une amélioration de la durabilité intrinsèque de l'industrie chimique et de la production de matériaux, soit à une réduction de l'empreinte environnementale des industries « aval » ;
- les technologies « de performance » : il s'agit de technologies basées sur le développement de solutions multifonctionnelles capables de répondre aux nouvelles exigences des secteurs d'applications en aval ;
- les technologies « alternatives » : elles reposent sur l'utilisation et la transformation de produits issus de la biomasse ou de ressources végétales renouvelables.

Le schéma ci-dessous explicite les technologies clés retenues en fonction de leurs réponses aux enjeux ci-dessus :

Nanomatériaux	• Technologie durable • Technologie de performance
Simulation moléculaire	• Technologie de performance • Service (accompagnement des clients dans leur développement)
Biotechnologies blanches	• Technologie alternative
Microstructuration	• Technologie durable
Catalyse	• Technologie durable
Dépôt de couche mince	• Technologie de performance • Service (accompagnement des clients dans leur développement)
Matériaux fonctionnels, intelligents et de performance	• Technologie de performance
Capteurs	• Technologie de performance
Procédés membranaires	• Technologie durable
Fabrication rapide	• Technologie de performance
Elaboration de composites / Assemblages multimatériaux	• Technologie de performance
Contrôle Non Destructif (CND)	• Technologie de performance • Service (accompagnement des clients dans leur développement)

## Analyse de la position de la France

### Compétences et positionnement

Le secteur de la chimie, des matériaux et des procédés est un secteur historique de l'économie française. Il est aujourd'hui organisé autour de grands champions mondiaux (Rhodia, Air Liquide, Arkema, Saint-Gobain, Lafarge, Essilor, etc.) et de nombreuses PME-PMI dans les domaines de la chimie et des matériaux de spécialités (les PME-PMI représentent 80 % du paysage industriel français).

La France dispose d'atouts scientifiques indéniables qui lui ont permis de jouer les premiers rôles mondiaux dans ces domaines. Cependant, la France voit ses positions s'éroder notamment par un transfert R&D-industrie encore trop faible. Aujourd'hui, le problème de ce secteur est plus sur la mise en place d'une masse critique que d'un véritable retard technologique. Par ailleurs, l'évolution démographique des effectifs dans l'industrie fait peser une menace réversible sur l'avenir du secteur, due à la fois aux départs à la retraite et à un manque de qualifications reconnues. L'effort global de formation professionnelle régresse depuis plus de dix ans relativement au PIB.

Au niveau des efforts de R&D, on dénombre près de 13 500 chercheurs et enseignants-chercheurs directement en prise sur ces secteurs (effectifs associés aux domaines chimie et physique) soit environ 15 % des effectifs totaux de la recherche publique [1].

### Production scientifique

L'analyse des indicateurs établis par l'Observatoire des sciences et techniques (OST) montre que la production scientifique dans les domaines chimie et physique (recouvrant des problématiques chimie, matériaux) est en diminution en terme de contribution au niveau mondial.

Entre 2001 et 2006, cette baisse est constatée dans toutes les sous-disciplines liées à la chimie et aux matériaux (jusqu'à -20 % pour les matériaux polymères et la chimie analytique). Cependant, la bonne performance de la sous-discipline énergie-génie chimique et industriel (+20 %) doit être soulignée.

Par ailleurs, l'indice d'impact de la France est légèrement supérieur à la moyenne mondiale, ce qui traduit une augmentation de notre visibilité au niveau international malgré la diminution de notre contribution. Cette visibilité s'est accrue grâce à des publications dans des journaux à forte visibilité internationale (indice d'impact espéré immédiat de 1,15 en chimie et de 1,06 en physique). Toutefois, notre ratio de citations est légèrement inférieur à 1, ce qui signifie que les publications françaises sur ces sujets sont moins citées que la moyenne au sein des journaux.

### Analyse des brevets

En 2006, dans le système américain de brevets, la France (septième rang global) rassemble 2 % des brevets et est spécia-



lisée en pharmacie-biotechnologie et chimie-matériaux.

Au niveau du système de brevets européen, la France ne présente pas de spécialisation particulière au niveau des domaines de la chimie et des matériaux (pour l'ensemble des sous-disciplines la France représente environ 5 % des brevets européens). À noter cependant une sous-spécialisation dans le domaine des traitements de surface (3,6 % des brevets).

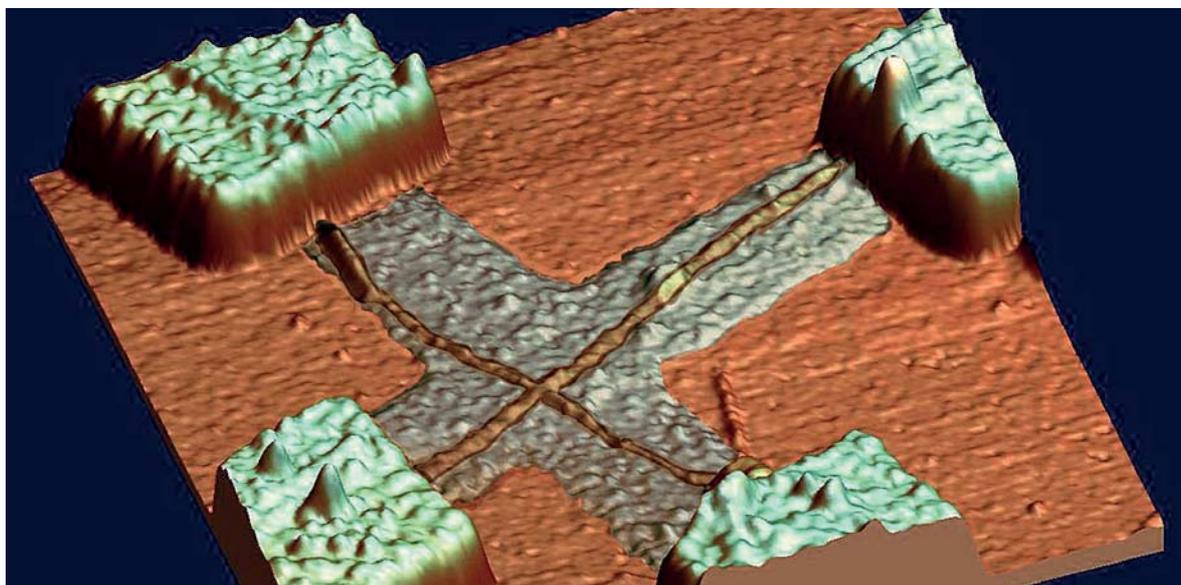
Cas particulier des nanotechnologies : l'analyse de la contribution française aux nanotechnologies est intéressante puisqu'elle montre clairement une contribution importante dans le domaine de la recherche académique (depuis le début des années 1990, la France fait partie des cinq pays majeurs en terme de contribution) mais une position faible dans le dépôt des brevets (moins de 5 % des brevets nanotechnologies déposés au niveau mondial). Ces résultats reflètent l'importance d'améliorer encore le transfert entre monde académique et monde industriel.

### Dispositifs d'accompagnement

Comme cela a été mentionné à plusieurs reprises, un des principaux enjeux du secteur de la chimie et des matériaux est d'accompagner les ruptures et les mutations de ses secteurs d'applications. En conséquence, les soutiens financiers actuellement mis en place, notamment dans le cadre du programme investissements d'avenir (grand emprunt), n'apparaissent pas directement sous la dénomination « chimie-matériaux ». Mais les soutiens aux nanotechnologies, aux biotechnologies, aux filières industriels et PME... sont autant de soutiens à la filière « chimie, matériaux et procédés ». Néanmoins, dans ce cadre, encore une fois, l'enjeu des « chimistes » sera de s'associer en amont à ces programmes de développement pour jouer pleinement leur rôle.

Bien que la France dispose d'un dispositif de soutien à l'innovation performant, notamment avec Oséo, il existe peu de création d'entreprises dans le domaine de la chimie et des matériaux. Se pose en particulier pour ces métiers le problème du financement d'activités généralement très capitalistiques.

Au-delà des dispositifs de soutien financier, le secteur de la chimie, des matériaux et des procédés bénéficie de nombreux dispositifs d'accompagnement à la recherche et notamment la recherche collaborative : les pôles de compétitivité (dix pôles de compétitivité à vocation mondiale ou plus spécifiques sur la chimie, les matériaux, les procédés), les instituts Carnot (transfert de technologies), les appels à projets (ANR, PCRD, etc.).



## Recommandations

Le cadre réglementaire dans le secteur « chimie, matériaux et procédés » est très présent. Il est indéniable que ces multiples réglementations ont permis de structurer et d'améliorer l'image de ce secteur, mais d'un autre côté, elles peuvent être un véritable frein au développement de notre tissu industriel (majoritairement composé de PME) dans un contexte de concurrence mondiale. Il convient donc de s'assurer d'une mise en cohérence du cadre réglementaire et de ses évolutions pour éviter une paralysie de la filière, et *a contrario*, faire de la réglementation un outil contribuant à la compétitivité des entreprises françaises.

Dans les années à venir, le secteur « chimie, matériaux et procédés » aura à faire face à la gestion de la ressource pétrolière. L'approche « chimie du végétal » est une opportunité pour répondre à la fois à cet enjeu et pour répondre aux attentes du marché pour des produits « verts ». Cependant cette nouvelle approche transversale nécessite de créer des passerelles entre différentes filières (agricole, chimique, matériaux). Afin d'obtenir de véritables synergies, il est important de développer une coordination autour de la chimie du végétal en anticipant dès à présent les questions de la formation spécifique et des investissements nécessaires pour la mise en place d'unités de production compatibles avec les besoins des marchés en aval.

L'analyse transversale des technologies clés « chimie, matériaux et procédés » fait clairement ressortir que la France souffre d'une part, d'une capacité de transfert réduite entre sa recherche académique et son industrie et d'autre part, d'un éloignement entre PME et grands groupes. En conséquence, la France, qui est généralement positionnée dans les pays leaders au niveau de sa recherche académique, se retrouve distancée lors de la phase d'industrialisation. Il est donc important de travailler aujourd'hui à la mise en place et au renforcement d'outils facilitant à la fois les transferts technologiques entre R&D et industrie et le rapprochement des PME et des grands groupes. Ceci pourrait être facilité par le développement de plates-formes

technologiques ou de démonstrateurs autour des technologies clés retenues. Cependant une réflexion doit être menée pour identifier les modes de fonctionnement les plus adéquats de ces outils pour réellement favoriser la mise en place de véritables filières technologiques. À titre d'exemple, en Allemagne, la filière des nanotechnologies s'est développée avec la mise à disposition de moyens financiers pour des projets d'innovations industrielles prenant en compte toute la chaîne de valeur (collaboration entre entreprises, universités et organismes de R&D extra-universitaires).

La prise en compte du devenir du matériau en fin de vie, dès sa conception, devient un élément majeur pour répondre aux attentes environnementales de notre société. Ce point soulève la question de la mise en place de filières de recyclage adaptées aux nouveaux matériaux (matériaux multifonctionnels, assemblage multimatériaux). Cycle de vie et éco-conception sont des notions qui devront être encore plus fortement intégrées dans les développements amont.

Le succès du développement de certaines technologies clés passe par une étape de normalisation (nanotechnologie, prototypage rapide, capteur, catalyse). Il se pose alors la question de l'accès des PME à la normalisation et d'un soutien à mettre en place pour ne pas faire de ce paramètre un frein mais un facteur clé de succès pour l'ensemble de notre tissu industriel.

D'un point de vue technologique, il est important de souligner qu'on assiste aujourd'hui à une très forte augmentation des approches multidisciplinaires qui vont nécessiter de plus en plus des profils « particuliers » capables de faire le lien et d'assurer une synergie entre les différents domaines. À titre d'exemple, ces éléments sont déjà pris en compte aux États-Unis dans le cadre des développements des nanotechnologies avec la mise en place de la *Nanotechnology Education Act*. Une réflexion sur la formation doit donc être lancée notamment au niveau des nanotechnologies et de la chimie du végétal afin de s'assurer du développement de notre propre savoir-faire sur ces thématiques.



# 1. Nanomatériaux

## Définitions

Au-delà des applications actuelles connues des nanotechnologies touchant un grand nombre de secteurs d'applications industrielles, il est important de souligner que le réel potentiel de rupture des nanotechnologies repose sur la mise en convergence de nombreuses disciplines telles que la chimie, la physique, la biologie ou l'ingénierie. En ce sens, les nanotechnologies se positionnent comme une technologie clé transversale. Les nanotechnologies rassemblent à la fois les nanomatériaux, les nano-produits, les procédés de fabrication, de manipulation, de caractérisation et les outils de modélisation-simulation travaillant à des échelles de l'ordre de la centaine de nanomètres. A ces échelles, la matière présente de nouveaux comportements, de nouvelles propriétés à exploiter.

## Description

Dans la famille des nanoproduits, deux catégories principales peuvent être considérées :

- Les nanomatériaux : ils présentent des propriétés inédites en raison de leur structuration à l'échelle nanométrique. Ils existent sous la forme de nanoparticules (nanotubes, nanofils, nanocristaux...). Ils peuvent également se présenter sous la forme de dépôts en surface ou bien dispersés dans le volume des matériaux traditionnels ; on parle alors de nanocomposites. Jusqu'à présent les nanotubes de carbone ont été la figure emblématique des nanomatériaux. Il existe actuellement un fort engouement pour les graphènes (cristal plan) en raison de leurs formidables propriétés de conductivité.
- Les nanosystèmes : ils concernent des unités fonctionnelles à l'échelle nanométrique. Différents nanosystèmes peuvent être considérés de conception « simple » comme les systèmes de délivrance de principes actifs jusqu'à des systèmes complexes futuristes comme les nano-robots.

Deux voies principales de production accompagnent le développement des nanomatériaux : la voie *top-down* ou miniaturisation qui consiste en une optimisation des procédés classiques de production (gravure en électronique, broyage pour la production de matériaux) et la voie *bottom-up* qui consiste à créer les molécules ou systèmes ayant la fonction désirée à partir d'assemblage d'atomes. Cette deuxième voie encore au stade de recherche amont est très intéressante car elle ouvre des perspectives de nouveaux procédés de production propres et économes en énergie.

## Applications

Les nanomatériaux ont des applications dans tous les secteurs industriels. Historiquement, le marché de la micro-électronique a été le premier à bénéficier des effets de la miniaturisation offerts par les nanotechnologies. À la suite de cela, de nombreux secteurs se sont intéressés aux nanotechnologies, soit dans une logique de recherche d'amélioration incrémentale de la performance, soit dans une logique de rupture. On peut citer en particulier : les transports (automobile, aéronautique...), le textile, la cosmétique, l'alimentaire, la pharmacie, le bâtiment...

En 2007, le marché mondial des nanotechnologies était estimé à 135 milliards de dollars. En 2010, le marché des nanomatériaux seuls est estimé entre 2 et 3 milliards d'euros [2]. Ces valeurs sont encore loin des promesses d'un marché des nanotechnologies estimé au début des années 2000 à 1 000 milliards de dollars [3] mais la course est lancée. Le nombre de produits incorporant des

nanotechnologies est en progression constante (400 % de croissance sur la période 2005-2009) [4].

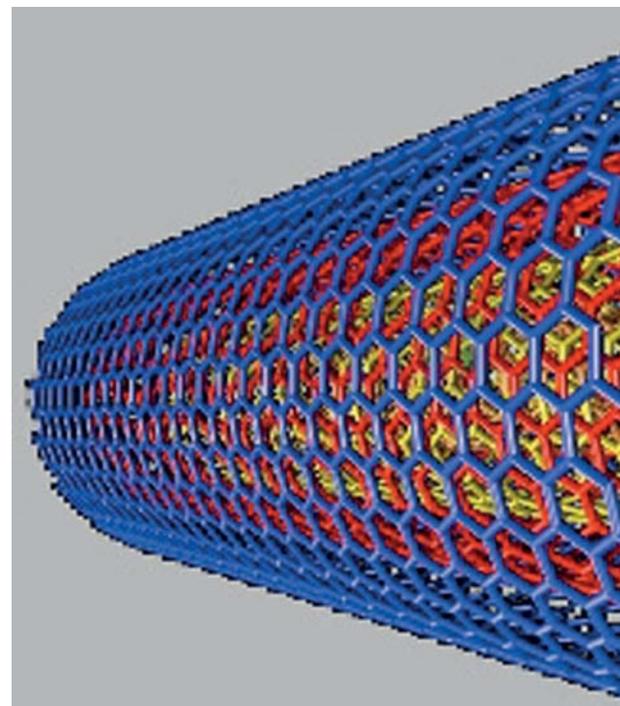
## Enjeux et impacts

Au-delà des améliorations incrémentales, les nanomatériaux permettent d'envisager des solutions originales aux défis que sont l'énergie (stockage de l'énergie, photovoltaïque souple, piézo-électricité), la lutte contre la pollution (nanomatériaux pour la réduction de la consommation de carburants, la dépollution des sols, le traitement des eaux), la prévention des maladies infectieuses (système de délivrance de principes actifs, nanosystèmes médicaux) ou le développement de nouvelles architectures en électronique (nanoélectronique).

L'ensemble des innovations accessibles aux nanomatériaux, et plus largement aux nanotechnologies, place ces technologies comme la quatrième révolution industrielle. En ce sens, elles apparaissent comme un véritable levier pour maintenir la compétitivité des industries françaises.

L'impact des nanotechnologies se mesurerait par la création de 400 000 emplois en Europe et de plusieurs centaines de milliers d'emplois indirects. Ainsi, il est prévu que 10 % des emplois manufacturiers seront liés aux nanotechnologies d'ici à 2015 avec notamment la création d'entreprises liées à cette thématique.

Cependant, au-delà des verrous technologiques associés aux nanomatériaux, les principales barrières actuelles se situent au niveau sociétal, en particulier, l'acceptation par les populations n'est pas acquise. Il se pose notamment des questions sur le ratio performance/risque lié à l'introduction de ces technologies et plus généralement des questions « hygiène-sécurité-environnement »



### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

pour l'ensemble des personnes qui auront un contact direct avec des nanomatériaux (production, consommation, recyclage).

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA (Minatec, Leti, etc.), Fédération C'Nano, Ineris, Inserm, CNRS (IEMN, LPN, IEF, LAAS)
- **Intégrateurs/Utilisateurs** : Arkema, Marion Technologies, EADS, Mecachrome, Nanoceram, Olmix, Rhodia, STMicroelectronics, Saint-Gobain
- **Centres de compétences** : Pôle Axelera, Aerospace Valley, Cancer-Bio-Santé, Lyon-Biopôle, Medicen, Minalogic, System@tic

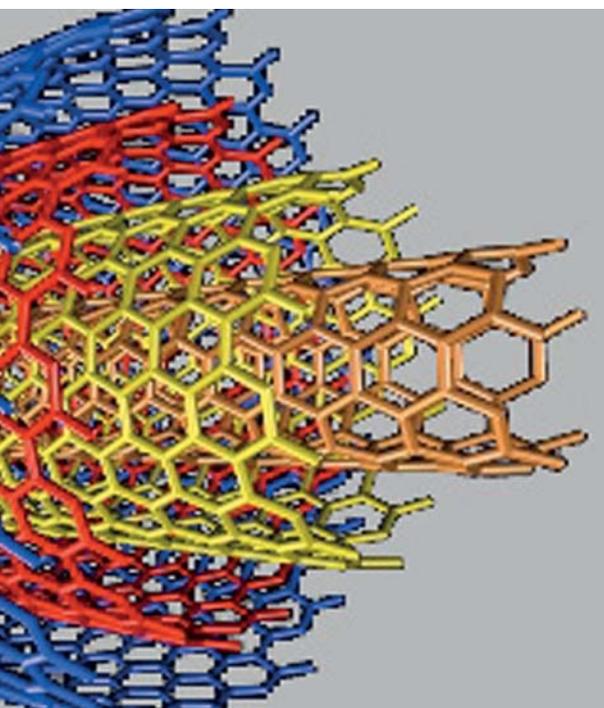
## Position de la France

La France a depuis le départ une position de leader au niveau de la recherche, engagée dans les nanotechnologies, avec notamment plus de 220 laboratoires rassemblant quelques 7000 personnes. Néanmoins, la France accuse aujourd'hui un retard par rapport à l'Allemagne, aux USA et au Japon sur le plan de l'industrialisation.

À noter cependant quelques réussites tant au niveau de la production de nanomatériaux (Arkema - nanotube, Rhodia - silice) qu'au niveau des centres de compétences d'envergure mondiale (Minatec).

Par ailleurs, la mise en place de Nano-Innov est une avancée majeure pour la mise en place de centres d'intégration autour des nanotechnologies.

Sur les questions HSE, la France se positionne aujourd'hui dans les pays de tête (avec l'Europe du Nord).



## Analyse AFOM

### Atouts

Dynamiques fédératives visibles et efficaces: C'Nano, Instituts Carnot, Minatéc, Nano-Innov; croissance continue du financement public de la recherche (+10 % /280 M€ en 2007)

### Faiblesses

Transfert industriel limité, la France détient moins d'un tiers des brevets européens; peu de producteurs sont présents.

### Opportunités

Quatrième révolution industrielle, de nombreux secteurs industriels concernés; développement des techniques d'analyses à l'échelle nanométrique et de nouveaux matériaux de rupture tel que le graphène.

### Menaces

Impacts HSE inconnus, appréhension sociétale grandissante; montée industrielle en puissance des USA, Japon, Allemagne, Chine.

## Recommandations

Les nanomatériaux constituent un axe stratégique à ne pas négliger au niveau national en favorisant en particulier le croisement des technologies afin de créer des matériaux inédits (nanomatériaux et technologies membranaires par exemple, ...).

Par ailleurs, il est nécessaire de promouvoir les échanges entre les différents secteurs, les disciplines scientifiques et l'ensemble des acteurs impliqués. Cela passera en particulier par :

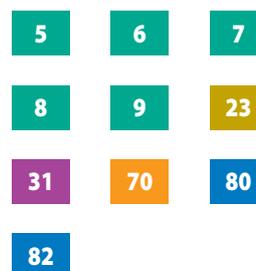
- le renfort des transferts des laboratoires vers les industries;
- l'intégration des nanotechnologies au sein des PME, notamment grâce au plan Nano-Innov.

L'élaboration de méthodes permettant d'évaluer la valeur ajoutée strictement attribuable aux nanomatériaux permettrait d'objectiver et de dépassionner le débat qui se développe actuellement sur le ratio performance/risque de ces matériaux.

Il est également nécessaire de maintenir une position de leadership sur les questions HSE autour du développement des nanomatériaux.

Enfin, il est important d'intensifier la recherche prénormative, afin d'assurer plus de standardisation en la matière, ce qui permettra de ne pas subir des normes étrangères qui pourraient avoir un impact négatif sur les entreprises françaises ayant développé les technologies.

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 2. Simulation moléculaire

### Description

La simulation numérique du comportement des systèmes permet de réaliser des interprétations mécanistiques aux niveaux moléculaire et atomique souvent inaccessibles par l'expérience. Elle permet d'accéder de manière détaillée au comportement du système étudié.

La simulation moléculaire englobe toutes les méthodes théoriques et toutes les techniques de calcul utilisées pour modéliser ou simuler le comportement des molécules.

Profitant de la disponibilité d'ordinateurs puissants à un coût modéré, la simulation moléculaire offre maintenant des prédictions fiables dans de nombreux cas où les méthodes classiques, telles que les équations d'état, ont des capacités de prédiction limitées. Ceci est particulièrement utile pour la conception de processus impliquant des éléments toxiques ou des conditions extrêmes de pression et/ou de température.

L'évolution de cette technologie se place dans un cadre plus global que le seul aspect réactionnel et moléculaire. En effet, un développement majeur en simulation concerne la prise en compte de toutes les échelles qui constituent un procédé. C'est-à-dire que la modélisation devra associer les échelles nano, micro et macro dans des notions d'espace et de temps afin d'assurer la création de l'usine de demain (propre, adaptative, compétitive).

### Applications

De nombreux acteurs sont intéressés par les applications de la modélisation moléculaire, en particulier l'industrie pharmaceutique ainsi que tous les secteurs de la chimie (lourde, fine, durable). La simulation moléculaire est également de plus en plus utilisée dans le domaine de l'élaboration de matériaux, notamment pour apporter une meilleure compréhension de leurs comportements (élasticité, déformation plastique...).

Il est possible de concevoir par ordinateur de nouvelles molécules actives basées sur la structure d'un récepteur et/ou sur des ligands ainsi que de développer des médicaments.

Pour les matériaux, il est possible de réaliser un polymère en fonction de l'usage désiré, par exemple un polymère pour lentilles de contact avec les propriétés adéquates. D'après le cabinet Fuji-Keizai, le marché direct de la modélisation moléculaire dépasserait les 2 Md\$ chaque année.

### Jeux et impacts

En permettant de visualiser, en trois dimensions, les molécules et leurs interactions, de calculer et prédire la plupart de leurs propriétés, et donc d'éliminer toutes celles dont



la géométrie ou les propriétés sont incompatibles avec l'action recherchée, la modélisation moléculaire réduit le temps nécessaire pour la recherche et la conception de nouvelles molécules chimiques ou biologiques. Il est également possible de prédire la toxicité d'une molécule et d'évaluer les meilleures conditions de réactions afin de limiter l'utilisation de solvants.

Dans un contexte où le développement durable devient un enjeu majeur pour les économies et pour la planète, le calcul intensif est un des outils les plus prometteurs. Par sa capacité à simuler et à optimiser les phénomènes les plus complexes, il va accélérer la recherche, le développement et la production de nouveaux produits et de nouveaux services, dans des conditions environnementales optimales. Il permettra, par exemple, d'accélérer la recherche sur les nouvelles énergies, d'introduire de nouvelles molécules et de nouveaux composants pour les industries chimique et pharmaceutique, ou encore d'améliorer la compréhension des impacts sur les écosystèmes de nouveaux produits agricoles. La simulation numérique à très grande échelle devient ainsi un outil fondamental pour associer développement durable et développement industriel.

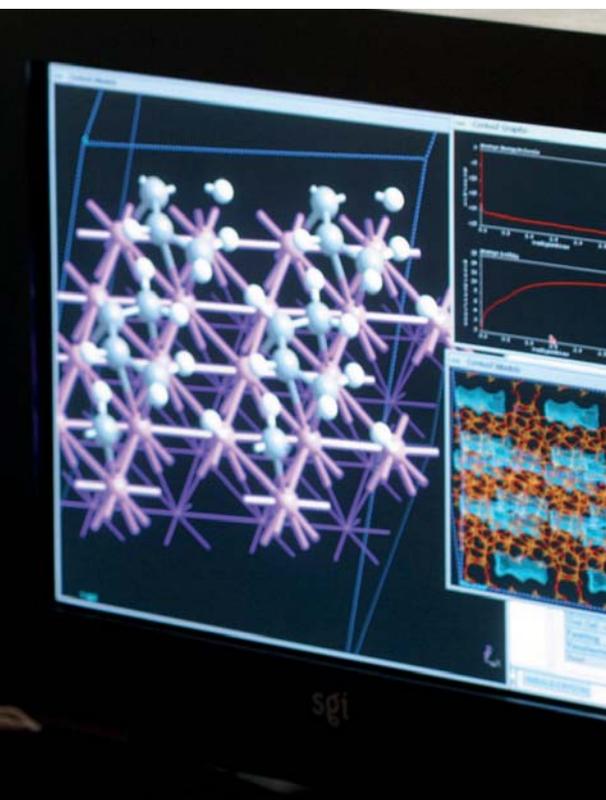
Cependant, le développement de la simulation moléculaire passera par une acceptation au niveau industriel. S'il est indéniable qu'il y a une évolution naturelle vers

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



l'utilisation de telles approches, la modélisation ne saurait remplacer l'expérience et le savoir-faire dans la mise au point d'un nouveau composé ou produit. Il faut donc s'attacher à créer des synergies entre ces deux approches. En effet, la simulation moléculaire joue un rôle clé pour corroborer et expliquer les travaux expérimentaux, et ensuite prédire et proposer des nouveaux composés adaptés pour une tâche ou des nouvelles expériences à effectuer.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CNRS LCPO, LAAS, PBIL, IBCP, Société Française de Biophysique, Inserm, CEA (Le Ripault Tours, Grenoble et Saclay), École des mines, Chimie ParisTech, Cermics, Micmac, Groupe de Graphisme et de Modélisation Moléculaire
- **Intégrateurs-utilisateurs** : Air Liquide, Dassault Systèmes, IFP Énergies Nouvelles, Sanofi Aventis, Total
- **Centres de compétences** : Pôles RNMM (Réseau Normand de Modélisation Moléculaire), Alliance française Simbio-sys

## Position de la France

La France a une tradition mathématique importante et une forte connaissance en modélisation numérique, en particulier, dans les secteurs automobile et aéronautique où les compétences françaises en la matière ont permis de pousser les modélisations des appareils à un niveau élevé de précision. De même, la recherche française est historiquement bien positionnée en chimie computationnelle.

Au niveau européen, la France participe à différents groupes de recherche tels que le COSTD37 (*Grid Computing in Chemistry*) ou DIRAC (*Program for Atomic and Molecular Direct Iterative Relativistic All-electron Calculations*).

## Analyse AFOM

### Atouts

De nombreux acteurs et des connaissances françaises poussées en modélisation.

### Faiblesses

Un manque de coordination avec les industriels ; des laboratoires de recherche dispersés donc pas de synergie ; un déficit important de formation théorique.

### Opportunités

Des applications très variées ; une demande croissante pour une connaissance poussée à l'échelle moléculaire ; la diminution des coûts de développement pour les utilisateurs.

### Menaces

Le développement d'une solution logicielle non française avec des standards différents.

## Recommandations

Le soutien au développement de la simulation numérique passe par :

- le rapprochement des compétences au sein d'un même pôle. La modélisation des systèmes chimiques et des matériaux pourrait être une nouvelle compétence du pôle System@tic. Ce rapprochement est d'autant plus important que la simulation numérique, bien qu'elle soit transversale, ne bénéficie pas de programmes ANR dédiés, ce qui limite son développement ;
- la création de formations académiques alliant l'informatique aux sciences de la chimie et des matériaux, à l'image du master de biologie moléculaire et cellulaire mis en place à l'université de Jussieu (Paris) ;
- la démocratisation de l'accès au calcul numérique pour accélérer l'innovation et en faire un moteur de développement économique ;
- le développement de ressources logicielles gratuites.

## Liens avec d'autres technologies clés

20

21

### Maturité (échelle TRL)

<input checked="" type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 3. Biotechnologies blanches

### Définitions

Les biotechnologies blanches (ou biotechnologies industrielles) consistent en l'emploi de systèmes biologiques (bactéries/enzymes) pour la fabrication, la transformation ou la dégradation de molécules ou de bio-systèmes grâce à des procédés enzymatiques ou de fermentation dans un but industriel. Elles ont pour objet la fabrication de produits chimiques et de bioénergie.

Les biotechnologies blanches reposent sur deux savoir-faire :

- Les biotechnologies enzymatiques : exploitation de biocatalyseurs ayant la capacité de reconnaître les formes énantiomériques de molécules complexes.
- L'ingénierie métabolique : utilisation de micro-organismes capables de transformer directement la biomasse (amidon, cellulose, oléagineux, protéines, saccharose, résidus organiques) ou des minerais (accumulation de métaux, production de sulfure métallique, volatilisation de métaux par méthylation).

### Description

Les biotechnologies blanches sont considérées comme un secteur en croissance. Cette évolution est portée par des premières générations d'enzymes et de micro-organismes issus du vivant. À plus long terme, cette croissance sera également portée par de nombreux développements effectués en amont. En particulier, l'essor de la génomique, de la protéomique, de la bio-informatique et de la biologie de synthèse donneront accès à des micro-organismes encore plus performants.

### Applications

Dans le domaine de l'énergie, les biotechnologies blanches sont aujourd'hui considérées comme matures avec en particulier la production de bioéthanol et autres biocarburants.

Limitées au début des années 2000 à des applications pharmaceutiques ou agroalimentaires, elles se développent de plus en plus vers les secteurs de la chimie, de la cosmétique, des emballages ou des secteurs intermédiaires tels que les fibres ou les plastiques.

Au-delà de ces marchés, les biotechnologies blanches sont en émergence sur d'autres industries comme le textile, le papier, les arômes et parfums ou encore le traitement des minerais.

Initialement positionnées sur des produits à haute valeur ajoutée, les biotechnologies blanches permettent maintenant la production d'intermédiaires réactionnels (acides acétique, lactique, succinique, fumarique, citrique, etc.), des produits chimiques (pesticides, tensioactifs, lubrifiants, etc.) et des polymères (PLA, PHA, etc.).

Actuellement, deux produits issus des biotechnologies blanches dépassent le million de tonnes par an : l'éthanol et l'isoglucose.

L'Union européenne a fixé un taux de pénétration des biotechnologies blanches de l'ordre de 15 % de l'ensemble de la production de l'industrie chimique d'ici à 2020. Il se situe en 2010 aux alentours de 10 %.

Le marché mondial des produits issus des biotechnologies blanches a été estimé à 125 Md\$ en 2010 [5], soit 160 % d'augmentation en 5 ans.

### Jeux et impacts

Les biotechnologies blanches ouvrent la voie à des améliorations réactionnelles par l'augmentation de la sélectivité, de la spécificité, de la cinétique et des rendements. En outre, elles présentent l'avantage de pouvoir réaliser les réactions à température ambiante et en milieu aqueux.

Concernant les matières premières, l'utilisation des enzymes et micro-organismes, au-delà des ressources fossi-

les classiques, permet l'emploi de matières premières renouvelables et la valorisation de la biomasse non alimentaire. Les biotechnologies blanches accompagnent, en particulier, le développement des filières de la chimie des agroressources et du bois.

En permettant une production dans des conditions plus douces, notamment de température, et à partir de ressources renouvelables, les biotechnologies blanches apparaissent comme une des réponses à plusieurs grands enjeux socio-économiques : indépendance vis-à-vis des ressources fossiles, impact carbone positif (réduction de l'utilisation de solvants pétrochimiques jusqu'à 90 %, voire totale suppression), diminution de la consommation en énergie (la consommation d'énergie et d'eau peut être abaissée de 10 à 80 %). Les biotechnologies blanches répondent aussi aux enjeux sociétaux en matière de produits verts à faible impact environnemental (émissions carbone faibles, produits biodégradables).

Même si l'aspect développement durable rend les biotechnologies acceptables par la population, les aspects d'organismes génétiquement modifiés restent un frein en général. Toutefois, les oppositions, dans les industries autres qu'agroalimentaires, devraient être moins importantes. En effet, les applications industrielles sont confinées dans les entreprises-bioraffineries, il n'y a pas de relargage dans la nature (risque industriel classique).

La mise en œuvre de nouveaux procédés liés à l'utilisation des biotechnologies nécessite des investissements importants, ce qui favorise l'utilisation actuelle de procédés traditionnels sur des unités déjà existantes, en particulier du fait d'un contexte économique difficile.

Des verrous techniques subsistent en particulier pour la gestion de la survie, de la pérennité et du maintien des performances des micro-organismes et des enzymes utilisés.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

- **R&D** : LISBP (Insa Toulouse), ICSN, IFP, Inra, Genoscope
- **Utilisateurs** : Arkema, Aventis, Bioattitude, Biométhodes, BMSsystems, Caspeo, Chamtor, Deinove, Lesaffre, Libragen, Metabolic Explorer, Proteus, Roquette, SNF, Sofiprotéol
- **Centre de Compétences** : ARD, Industries Agro-Ressources (IAR), Axelera

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Position de la France

La France présente un fort potentiel d'utilisateurs de la technologie avec des leaders de l'industrie chimique mais manque d'un grand producteur d'enzymes, ce qui oblige les utilisateurs à se fournir à l'étranger.

En comparaison, les États-Unis affichent le même nombre de sociétés qu'en Europe, mais emploient deux fois et demie plus de personnes et dépensent trois fois plus en R&D que l'Europe.

## Analyse AFOM

### Atouts

Deuxième puissance agricole mondiale, deuxième producteur chimique européen, pôles de compétitivité à vocation mondiale, nouveaux investissements du grand emprunt (bioraffineries, autres...).

### Faiblesses

Faible transcription des recherches en développements technologiques, manque d'intégration interdisciplinaire et de coordination, peu de producteurs d'enzymes français.

### Opportunités

Répondre aux enjeux de la chimie verte, en misant sur des innovations concernant les produits et les procédés, assurer la compétitivité de l'industrie chimique française et européenne.

### Menaces

Demandes sociétales contradictoires, fort développement des biotechnologies dans les pays asiatiques (Chine, Inde). Manque de formation spécifique biotechnologies et bioproducts dans le système d'enseignement français actuel. Absence d'articulation à l'échelle européenne.

## Recommandations

Les biotechnologies industrielles rassemblent, par nature, des technologies qui font appel à des compétences pluridisciplinaires (besoin en techniques de séparation, en capteurs et en automates, en technologies d'extraction et en purification, ainsi qu'en informatique de gestion des procédés). Afin de soutenir le développement de cette filière, la question de la formation de nouveaux profils multidisciplinaires doit être étudiée.

Le développement des biotechnologies blanches dans le secteur de la chimie peut être assuré par la création de véritables bioraffineries ayant d'importantes capacités de production. Cependant, les molécules biosourcées réalisées dans ces plates-formes restent encore peu connues. Des efforts importants sont à mener pour prendre en compte ces nouvelles molécules dans les normes afin de faciliter leur production.

La France devrait rassembler ses compétences sur le domaine précis et porteur qu'est la production de sucres fermentescibles à bas coûts à partir de la lignocellulose. Par ailleurs, il y a nécessité de développer des recherches en ligne avec le *strategic research agenda* de la plate-forme SUSCHEM en prenant le leadership sur des projets européens.

## Liens avec d'autres technologies clés

5

39

41

57

72

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 4. Microstructuration

### Définitions

Les technologies microstructurées constituent une classe innovante d'équipements de synthèse et de production de composés chimiques. Ces outils s'intègrent dans une approche nouvelle (liée à la microfluidique) s'appuyant notamment sur l'utilisation d'unités réactionnelles élémentaires associées en parallèle pour obtenir des unités de production de forte capacité.

Ces technologies reposent sur une structuration des outils de production à l'échelle de la centaine de microns. Elles permettent de tirer profit des comportements fluidiques et réactionnels originaux qui apparaissent à ces échelles. Elles permettent de favoriser un meilleur contrôle des conditions de réactions, une diminution de la taille des équipements, une amélioration des conditions de sécurité et des économies d'énergie. Elles apportent aussi une grande flexibilité lors des augmentations de capacité de production et facilitent les étapes de *scale-up* des procédés.

### Description

Il existe deux grandes familles de technologies :

- les micro-outils : microréacteurs, micromélangeurs, microéchangeurs ;
- les outils microstructurés (microstructuration d'une partie d'un outil macroscopique) : échangeurs thermiques compacts, réacteurs chimiques microstructurés de taille macroscopique.

Les microréacteurs fonctionnent sur le principe d'un procédé en continu et se différencient fortement des réacteurs de synthèse traditionnels par plusieurs caractéristiques clés comme un plus haut gradient de température et de pression, un transfert thermique plus élevé et une augmentation de la surface d'échange surface/volume. L'évolution de ces technologies se place dans le cadre de l'intensification des procédés. Intensification réalisable aussi par l'association des technologies de miniaturisation et des technologies multifonctionnelles avec hybridation des opérations unitaires dans le même équipement (distillation catalytique, couplage réaction-cristallisation, cristallisation-distillation, réacteurs chromatographiques, etc.).

### Applications

Le principal marché de ces technologies est celui de l'industrie chimique notamment pour des réactions difficiles à mettre en œuvre au niveau industriel (sulfonation, nitration, hydrogénation, méthylation...). Cependant les développements restent encore ponctuels, limités principalement aux acteurs de la pharmacie, de la chimie fine et de la chimie de spécialités. En 2006, les micro-réacteurs représentaient un marché de l'ordre de 100 millions de dollars [6] mais les opportunités de développement sont importantes. Le groupe suisse Lonza [7] a d'ailleurs à ce sujet réalisé une étude se basant sur leurs vingt-deux plus grands *process* :

50 % des réactions en chimie fine et pharmacie pourraient bénéficier d'une production en mode continu grâce à la technologie microstructurée.

Au-delà de ces premiers secteurs d'applications, des opportunités sont également pressenties dans les secteurs des gaz industriels, de la chimie de base et des produits pétroliers (raffinage). En effet, il a été démontré par le Centre de la technologie de l'énergie de CANMET-Varenes au Canada (CTEC Varenes) qu'adopter de nouveaux échangeurs de chaleur ou augmenter la surface d'échange thermique engendre des économies d'énergie de 15 % à 35 % dans les raffineries ou les usines pétrochimiques. On imagine ainsi très bien les bénéfices dans le secteur des gaz industriels où les coûts énergétiques représentent près de 40 % des coûts de production.

### Enjeux et impacts

Il s'agit clairement d'un sujet à fort enjeu pour la compétitivité industrielle de la France dans la mesure où les technologies microstructurées :

- représentent une opportunité de maintien des activités industrielles et des compétences scientifiques liées à la chimie en France
- permettent de s'intégrer de façon significative dans des programmes d'innovation ou de recherche liés à la chimie verte et aux problématiques environnementales et de sécurité.

L'enjeu pour les années à venir ne se situe pas tant dans le développement toujours plus évolué de nouveaux dispositifs intensifiés, que dans l'intégration de ces nouveaux dispositifs dans des procédés de production déjà existants (procédé multi-échelle, passage *batch*/continu). Il s'agit aussi d'intégrer la microfluidique dans le développement des méthodes de conception de procédés à la place des procédés classiques.

En effet, les économies réalisables grâce aux technologies de miniaturisation peuvent être associées à la réduction des dépenses énergétiques, des coûts d'investissements et de fonctionnements réalisables avec les technologies multifonctionnelles (hybridation des opérations unitaires), les économies étant de l'ordre de 20 % aujourd'hui.

Cependant, un des verrous pour une plus grande implémentation des technologies intensifiées en France concerne leurs coûts de production. Ce coût peut rester prohibitif face aux bénéfices qu'apporte cette technologie.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

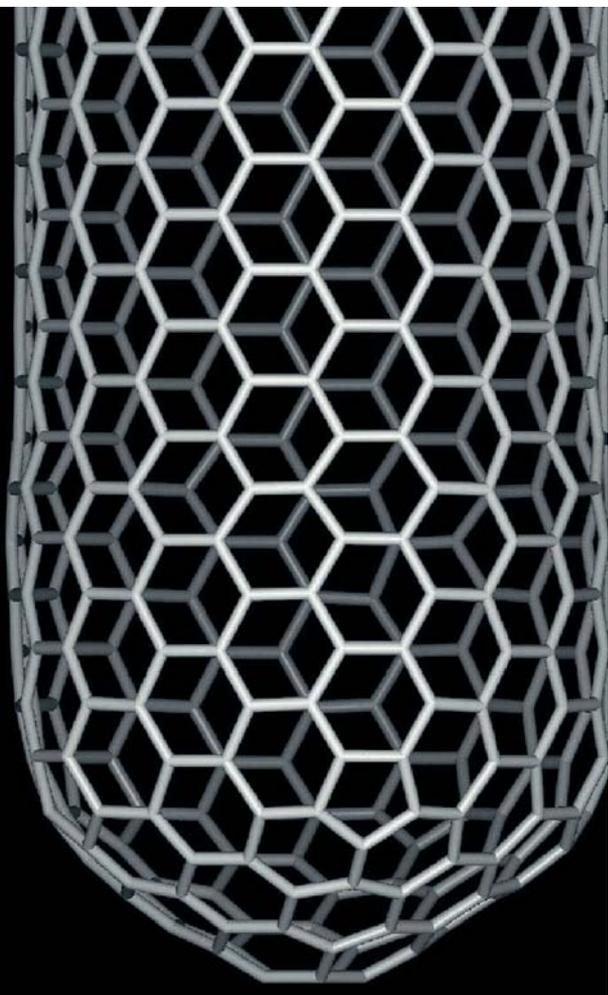
- **R&D** : LRGP, LGC-INPT, LGPC, CEA (GRETh-LETH), CNRS (LAAS)
- **Intégrateurs** : AETGroup, Alfa Laval, Boostec, Corning, Fives Cryogénie, Fluidgent, STMicroelectronics
- **Utilisateurs** : Pierre Fabre, Rhodia, Sanofi
- **Centres de compétences** : Pôle Axelera, IFP Energies Nouvelles, MEPI, PASS et à l'échelle européenne Gasmems et Suschem

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Position de la France

La France se situe plutôt en retrait par rapport aux pays moteurs que sont l'Allemagne, le Japon, la Grande-Bretagne, les Pays-Bas et les États-Unis.

Toutefois, la France bénéficie de nombreux acteurs en chimie et chimie fine ainsi que d'une force académique présente avec une volonté de structurer des actions impliquant à la fois la recherche publique et les industriels.

## Analyse AFOM

### Atouts

Recherche académique de pointe en matière de réacteurs microstructurés avec de nombreux centres de compétence ; forte industrie chimique en France avec une bonne renommée internationale et une volonté forte de structurer des actions entre recherche publique et entreprises.

### Faiblesses

Financements faibles comparés aux autres pays ; filière des technologies microstructurées peu développée.

### Opportunités

Utilisation des micro-outils dans les secteurs de la pharmacie, de la chimie fine, de la chimie de spécialité et des biotechnologies. Développement des outils microstructurés pour les industries des gaz, de la chimie organique et des produits pétroliers. Enfin, cette technologie fait partie des procédés liés au développement durable.

### Menaces

Capacité de production limitée et manque d'acceptation dans l'industrie, notamment pour des problèmes de connectiques entre réacteurs microstructurés ; cinq pays ont déjà développé la technologie de première génération (Allemagne, USA, Grande-Bretagne, Pays-Bas, Japon). Développement limité en raison de la lourdeur des investissements nécessaires.

## Recommandations

La microstructuration est une rupture technologique qui nécessite de mettre en place une filière organisée autour des laboratoires, centres de recherche, intégrateurs et utilisateurs finaux.

Il est nécessaire de tirer parti du potentiel de la mise en œuvre conjointe des technologies membranaires et des nanomatériaux dans le domaine des microréacteurs pour la chimie.

Le développement des technologies microstructurées pourrait passer par le lancement d'une deuxième génération de micro-outils (microréacteurs catalytiques, microréacteurs multiphasiques, microréacteurs composites, à surface fonctionnalisée) en réalisant la promotion et la diffusion de l'information entre la recherche et les industriels.

Cela devra aussi passer par un soutien à l'innovation industrielle (programmes partenariaux) en impliquant les grands groupes utilisateurs que sont les leaders mondiaux Air Liquide et Total dans le but de créer une filière autour des technologies microstructurées. Il sera également nécessaire de fédérer par des collaborations les compétences déjà existantes au sein des différents réseaux en France et en Europe.

La performance des microréacteurs a été démontrée. Cependant, il reste à démontrer la rentabilité de ces technologies afin de permettre leur diffusion dans le tissu industriel français.

### Liens avec d'autres technologies clés

1

5

9

83

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 5. Catalyse

### Description

Dans un contexte industriel tourné vers l'optimisation des procédés (améliorations environnementales, intensification des procédés de production), la catalyse apparaît comme une technologie clé dans la mesure où elle permet une amélioration de la cinétique et de la sélectivité des réactions chimiques. Le catalyseur participe à la réaction mais est régénéré à la fin de celle-ci. Les réactions catalysées sont réalisées dans des conditions optimisées (solvant, température, pression...).

La catalyse rassemble un ensemble de voies technologiques diverses : catalyse hétérogène, catalyse homogène, photocatalyse, biocatalyse, électrocatalyse... La catalyse hétérogène représente 95 % des réactions catalytiques industrielles.

Globalement matures, les technologies et les applications de la catalyse ont cependant atteint des degrés de développement divers : exploitée depuis plusieurs décennies dans l'industrie du raffinage, la catalyse est en émergence dans le domaine de la production d'hydrogène et de la production de carburants issus de la biomasse.

Ainsi, la catalyse reste un domaine encore en plein développement car la mise au point de nouveaux catalyseurs ouvre de nouvelles opportunités dans :

- l'accès à de nouvelles applications : polymérisation, réactions stéréospécifiques, reconversion de polymères (exemple du recyclage chimique des plastiques), traitement des gaz (procédé Fischer Tropsch) ou de la biomasse (lignocellulose en particulier) ;
- l'accès à de nouvelles matières premières (matière première renouvelable avec la biocatalyse) ;
- l'accès à de nouveaux procédés (intensification des procédés).

### Applications

Les applications de la catalyse sont très diverses. Mais on peut considérer que le marché de la catalyse se répartit sur trois principaux secteurs :

- les polymères et produits chimiques : la fabrication de plus de 80 % des produits chimiques dépend de réactions catalytiques ;
- la protection de l'environnement : traitement des émissions gazeuses des sources fixes (industrie) et des véhicules (pots catalytiques), traitement des eaux ;
- l'énergie : utilisation de catalyseurs dans de nombreuses étapes du raffinage.

Plus récemment d'importants développements ont été réalisés dans le domaine de l'environnement avec notamment l'intégration des catalyseurs dans le matériau pour la réalisation de surfaces photocatalytiques autonettoyantes.

Le marché mondial de la catalyse a été estimé à 15 Md\$ en 2007 avec pour principal secteur d'applications l'automobile suivi de la chimie (cette dernière représentant moins de 30 % du marché) [8].

Les prestations de services accompagnant la catalyse sont envisageables dans le cadre du recyclage des matériaux rares utilisés en tant que catalyseurs (solutions de régénération). Par ailleurs, de nombreux développements de catalyseurs nécessitent une approche « sur mesure » pour répondre à des exigences précises nécessitant des relations client-fournisseur étroites.

### Enjeux et impacts

La catalyse permet de trouver des solutions ingénieuses pour élaborer plus efficacement les molécules utilisées par les marchés en aval de l'industrie chimique (économie de matières premières, économie d'énergie, réduction des investissements, réduction du traitement des déchets).

En améliorant les rendements, et en diminuant la consommation énergétique, la catalyse constitue un véritable levier pour maintenir la compétitivité des entreprises françaises.

D'un point de vue réglementaire, la catalyse se présente comme une démarche permettant de faire face aux contraintes environnementales auxquelles sont soumis les industriels, contraintes qui ont été identifiées comme des facteurs pouvant peser sur la compétitivité des entreprises.

Aujourd'hui, l'évolution de la catalyse s'oriente vers la réalisation et la maîtrise de catalyseurs à l'échelle nanométrique afin d'améliorer les vitesses et sélectivités tout en utilisant des métaux peu onéreux à la place de métaux nobles. En effet, les catalyseurs courants sont aujourd'hui, entre autre, à base de platine et de rhodium, coûtant respectivement plus de 40 000 €/kg et 70 000 €/kg [9].

Cette volonté de trouver des alternatives aux métaux nobles s'appuie également sur l'intérêt de limiter notre dépendance à des matériaux dont les conditions d'accès restent difficiles.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : IRCELYon, IFP, UCCS (Lille), Lacco, LMCCCO
- **Intégrateurs** : Axens, Eurecat, Sicat
- **Utilisateurs** : Arkema, GDF-Suez, PSA Peugeot Citroën, Renault, Rhodia, Total, Veolia
- **Centres de compétences** : Pôle Axelera, Suschem

## Position de la France

D'un point de vue recherche académique, les acteurs du pôle Axelera et des différents laboratoires sur la catalyse placent la France dans le peloton de tête au niveau mondial.

La France présente un fort potentiel d'utilisateurs de la technologie avec des leaders de l'industrie chimique, de l'environnement et de grands acteurs du secteur du transport (automobile), mais présente des atouts limités pour la production de catalyseurs.

## Analyse AFOM

### Atouts

Fort potentiel scientifique, des groupes industriels leaders sur les marchés utilisateurs. La catalyse est un des trois axes thématiques du pôle Axelera et les laboratoires de recherche IRCELYon et IFP Énergies nouvelles sont des acteurs majeurs au niveau européen.

### Faiblesses

Présence encore limitée d'acteurs français au niveau de la production.

### Opportunités

Marché dynamique apportant une réponse aux exigences sociétales d'optimisation des procédés (diminution de l'impact environnemental, réduction du nombre d'étapes, utilisation de moins de solvants ou de solvants durables).

### Menaces

Les catalyseurs développés par la recherche ne sont pas toujours exploitables au niveau industriel (exemple des organométalliques), utilisation de métaux nobles, parfois toxiques.

## Recommandations

La diffusion des technologies de catalyse dans le tissu industriel français nécessite d'harmoniser les langages de communication scientifique et les normes du secteur. En effet, il est nécessaire de renforcer l'intégration et le rapprochement de la recherche française et européenne avec le monde industriel.

Le développement des moyens de simulation moléculaire est une ressource clé afin de trouver de nouveaux catalyseurs aussi bien pour ceux destinés aux secteurs « normés » (raffinage) que pour des secteurs propriétaires.

La création d'un site non-pétrochimique de validation pour les essais pilotes permettrait d'aider à l'émergence de nouvelles offres, notamment au niveau des PME, tout en favorisant des collaborations entre acteurs public et privé.

La production et la durée de vie des catalyseurs doit faire l'objet de plus de recherche afin d'assurer l'essor de la catalyse. La maîtrise de ces deux paramètres est envisageable par une meilleure connaissance des procédés qui leurs sont associés.

## Liens avec d'autres technologies clés

1

2

4

34

37

54

58

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 6. Dépôt de couche mince

### Définitions

Le traitement de surface et en particulier le dépôt de couche mince sont des techniques développées dans le but de procurer de nouvelles fonctionnalités ou performances aux matériaux.

Les fonctions recherchées sont multiples. En effet, il est possible de gérer la réflectivité optique, de réaliser des surfaces anticorrosion, bactéricides, auto-nettoyantes, adhésives, de mouillage, de frottement, de sensibilité-résistance à des espèces chimiques données, etc.

### Description

Les procédés de dépôt de couche mince utilisés en traitement de surface sont appelés également procédés de «fonctionnalisation de surface». Ils rassemblent de très nombreuses voies technologiques. Parmi les plus utilisées, il peut être cité :

- l'approche « dépôt chimique en phase vapeur ou CVD (Chemical Vapor Deposition). Le substrat est exposé à un ou plusieurs précurseurs en phase gazeuse, qui réagissent et/ou se décomposent à la surface du substrat pour générer le dépôt désiré. La CVD est basée sur un contrôle fin des vitesses d'évaporation et des flux gazeux pour atteindre les épaisseurs recherchées allant jusqu'à des couches ultra-minces utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs (Atomic Layer Deposition ou ALD). L'utilisation d'un plasma permet de diminuer les températures de fonctionnement et d'améliorer la qualité du dépôt. Il s'agit dans ce cas des procédés assistés par plasma (Plasma Enhanced CVD et ALD, ou PECVD et PEALD) ;
- l'approche « dépôt physique par phase vapeur ou PVD (Physical Vapor Deposition). Les principales méthodes de PVD sont des méthodes basées sur une pulvérisation cathodique (pulvérisation des atomes d'une cathode sous forme de particules neutres qui se condensent sur le substrat). Ces approches reposent uniquement sur des procédés physiques (évaporation sous vide haute température, bombardement plasma). Contrairement à la CVD, il n'y a pas de réaction chimique à la surface du substrat à revêtir ;
- l'approche « dépôt de couches minces par voie liquide ». Dans ce cas, les techniques les plus fréquentes sont le dépôt chimique en solution, l'électro-dépôt par synthèse électrochimique et la voie sol-gel. Dans ce dernier cas, il est possible d'obtenir « en conditions opératoires douces » des couches de haute performance notamment pour des applications en optique.

### Applications

De manière générale, le dépôt de couche mince adresse de nombreux marchés d'applications. Les principaux sont : la mécanique, l'automobile, le bâtiment, l'électronique, l'optique, la santé, les procédés de nettoyage sans solvant, le textile, la cosmétique et l'énergie.

On distingue de nombreuses applications. En électronique, il est possible de déposer tous types de métaux afin d'assurer une meilleur conductivité ou réaliser des interconnexions entre éléments. Dans le domaine du photovoltaïque, les technologies de CVD permettent de réaliser des couches minces de silicium cristallisé utilisées dans les panneaux solaires. Il est aussi envisageable de réaliser des capteurs chimiques ou physiques par la super-



position de plusieurs types de couches (adhérentes, résistives, actives). En optique, les couches minces sont appliquées sur des verres pour les rendre par exemple antireflet ou anti-UV.

Plus généralement, l'application de couches minces sur des matériaux permet de leur donner de nouvelles propriétés telles que l'anticorrosion, le renforcement de la dureté de surface ou encore la diminution des frottements. Ces trois fonctions constituent les principales préoccupations des industries mécaniques.

Le marché du dépôt de couche mince est un marché dynamique. À titre d'exemple, le marché mondial de la CVD devrait atteindre les 12 Md\$ d'ici à 2013. Il était estimé à 7,3 Md\$ en 2008 [10].

### Enjeux et impacts

Dans tous les secteurs industriels, la maîtrise de la conception et de la caractérisation de nouvelles surfaces est un enjeu majeur dans la mise au point des nouveaux produits.

Le dépôt de couches minces doit permettre d'assurer un accroissement de la compétitivité de l'industrie métallurgique par la production d'éléments avec de meilleu-

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

res ou de nouvelles fonctionnalités (propriétés mécaniques, hygiène) répondant aux nouveaux besoins des marchés d'applications.

La diffusion de cette technologie est inhérente à la mise en place d'une offre de services de traitement de surface « à façon » basée sur un savoir-faire de déposition capable de répondre aux exigences des différents secteurs et filières d'applications.

Ces technologies doivent en parallèle intégrer les considérations environnementales. En effet, généralement associée à une image de procédés polluants, la mise au point de dépôts de couche mince dits « propres » répond à des contraintes réglementaires grandissantes et apparaît comme un des enjeux majeurs du secteur. Par ailleurs, en développant des solutions multi-matériaux, la filière « couche mince » devra réfléchir à la prise en compte dès la phase de conception des produits des questions de recyclage.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA-Liten, Cetim, Femto-ST, LSGS, Cirimat
- **Intégrateurs-utilisateurs** : Essilor, Groupe HEF, Groupe Bodycote (HIT), Mecachrome, Saint-Gobain l'Electrolyse SA et plus de 200 entreprises répertoriées sur [www.tris-online.com](http://www.tris-online.com)
- **Centres de compétences** : Pôles Viameca, Matéralia, Electronique (CEA Liten), Céramique, Plasturgie et à l'échelle européenne, Hardecoat

## Position de la France

Dans le domaine du dépôt de couche mince, la France présente deux visages.

Une situation en pointe portée par des acteurs leaders dans leurs domaines et une recherche active sur le sujet.

Mais il existe également un risque de perte de savoir-faire lié à des effectifs en décroissance et un recul au niveau de l'accès aux technologies.

## Analyse AFOM

### Atouts

Présence de leaders internationaux, d'un tissu industriel très dense et d'une dynamique importante des PME/PMI en traitement des surfaces.

### Faiblesses

Manque de moteur national ; diminution de la main d'œuvre (non renouvellement), intégration de compétences difficile pour les PME.

### Opportunités

Réponse technologique des industriels aux contraintes réglementaires ; possibilité de définir une offre de service (externalisation des activités de surface, fonctionnalisation), forte demande des industries clientes sur des niches commerciales ; l'internationalisation des entreprises clientes peut être un levier de développement.

### Menaces

Mondialisation de l'économie et délocalisation des industries clientes (mécanique...) ; forte dépendance de ces entreprises (PME) à quelques donneurs d'ordres.

## Recommandations

Considérés comme une technologie mature, les dépôts de couche mince jouent un rôle capital dans l'élaboration de solutions multi-matériaux de performance. Toutefois, ces technologies doivent prendre en compte :

- le recyclage : enjeu d'importance pour des technologies majoritairement utilisées par des PME. De plus, le recyclage peut être un élément différenciant lorsqu'il est considéré dès la conception. Il sera néanmoins nécessaire de mettre en place des filières de recyclage associées.
- le risque d'une perte de compétences, notamment pour les PME qui seront à terme confrontées aux problèmes de l'accès à ces technologies. Sur ce point se pose la question de notre capacité et de notre volonté à maintenir un minimum de compétences autour de ces technologies.

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 7. Matériaux fonctionnels, intelligents et de performance

### Définitions

Les matériaux fonctionnels, intelligents et de performance représentent une famille large de matériaux développés pour répondre à l'évolution des cahiers des charges toujours plus complexes des marchés d'applications servis par l'industrie des matériaux. Cette famille couvre à la fois des demandes de performances techniques particulières (matériaux fonctionnels) et des besoins de solutions adaptatives et multifonctionnelles (matériaux intelligents)

### Description

Les matériaux de haute performance présentent des résistances inusuelles (mécanique, feu, corrosion...) ou bien des fonctionnalités particulières (antistatique, antibactérienne, autonettoyante).

Les matériaux dits « intelligents » sont des matériaux capables de réagir et de s'adapter à des modifications de l'environnement extérieur. On retrouve les matériaux à mémoire de forme, les matériaux auto-réparants/cicatrisants, photochromiques, à changement de phase, piézoélectriques, etc.

L'intégration de ces matériaux dans le produit final donne accès à de nouveaux systèmes (nouveaux capteurs de pression ou d'actionneurs tels les injecteurs à commande, les nanomanipulateurs) ou à de nouveaux produits (textiles respirants, communicants, composites conducteurs...).

La maîtrise de l'ensemble des sciences et techniques liées aux matériaux apparaît comme le facteur clé pour atteindre les performances recherchées. Dans ce cadre, la connaissance fine des structures à l'échelle moléculaire nano-, méso- et macroscopique est nécessaire. La maîtrise des procédés de mise en œuvre et de traitement des matériaux, notamment grâce à la modélisation, est également critique.

### Applications

Tous les marchés sont concernés par le développement des matériaux fonctionnels et intelligents. Les marchés les plus porteurs d'innovations technologiques sont historiquement les plus exigeants du point de vue des performances : espace, nucléaire, défense, aéronautique, automobile.

Mais d'autres secteurs apparaissent désormais moteurs pour la mise au point de matériaux plus performants ou multifonctionnels : la santé (biomatériaux), les sports et loisirs, l'emballage... Ces secteurs ont, par ailleurs, un impact important en matière de diffusion des innovations auprès du grand public.

Plus récemment, les suites du Grenelle de l'environnement impliquent le développement de matériaux « super isolants » permettant de faire face aux futures exigences thermiques (réglementations thermiques 2012, 2020).

Le secteur du textile est un exemple intéressant de l'apport de ces familles de matériaux. L'introduction de fibres haute performance a permis l'essor de la filière française textile technique (textile anti-feu, textile balistique, textile antistatique). La nouvelle génération concerne le développement de textile intelligent (communicant, médicalisé). En France, 400 entreprises (pour presque 20 000 salariés) ont été répertoriées comme ayant une



activité textile technique majoritaire et stratégique. Ce sont essentiellement des PME de moins de 50 personnes résolument tournées vers l'international. Leur chiffre d'affaires en 2007 s'est élevé à 3,5 milliards d'euros. Cela représente d'ores et déjà en France 30 % de la production de textile nationale avec 4 Md\$ en 2006 et 3 % de croissance annuelle [11].

### Enjeux et impacts

Les matériaux bénéficiant de nouvelles propriétés revêtent une importance particulière quant à la compétitivité future et au développement durable de l'industrie européenne. En effet, ils constituent la base de progrès techniques dans de nombreux secteurs.

Plusieurs enjeux se posent pour les matériaux fonctionnels et performants. Ils doivent en effet être plus performants, plus durables, avec de multiples fonctionnalités et avec l'aptitude à être transformés et à être recyclés.

Une coopération entre chimistes, physiciens, mécaniciens et formulateurs est nécessaire afin de garantir une adaptation optimale des performances des matériaux à leur usage. Ce besoin de collaboration au niveau scientifique et technique trouve un relais au niveau industriel dans la nécessité de développer les méthodes et outils de co-conception.

Les matériaux fonctionnels et intelligents sont clairement un exemple de solutions « amont » qui permettent de répondre aux nouvelles exigences et mutations des industries en aval, tels que l'allègement pour le transport, l'auto-réparation pour le génie civil. Dans ce cadre, la mise au

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



point de ces fonctionnalités et solutions inédites assure la croissance de la valeur d'usage des matériaux. L'introduction de solutions haute performance et/ou intelligentes permet également de miser sur les marchés de demain et de conserver une avance technologique.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA Leti, Onera, CNRS SIMap
- **Intégrateurs-utilisateurs** : ArcelorMittal, Areva, Arkema, Air Liquide, Dickson Constant, EADS, Imerys, Lafarge, Porcher, Rhodia, Saint-Gobain, Safran, Solvay, Total, autres acteurs de la FFM. Et 300 acteurs recensés sur [http://www.industrie.gouv.fr/observat/innov/materiau/so\\_mate.htm](http://www.industrie.gouv.fr/observat/innov/materiau/so_mate.htm)
- **Centres de compétences** : Pôles Axelera, Aerospace Valley, IAR, IFTH, Matéria, Plasturgie, Techtera, Up-Text et FEMS pour l'Europe

## Position de la France

La France a un positionnement historique sur les matériaux haute performance avec des leaders mondiaux (Saint-Gobain, Essilor, Arkema) et un tissu de PME innovantes notamment dans le domaine du textile. Pour faire face à la concurrence, le développement de centres de ressources techniques (Techtera, Materialia) de renommée européenne ou mondiale a été mis en place.

Par ailleurs, la France possède également les opportunités de développement avec un grand nombre d'acteurs de dimension internationale utilisateurs de ces technologies (secteurs du transport, de l'énergie, ...).

## Analyse AFOM

### Atouts

Potentiels d'acteurs industriels et de centres de ressources importants, tissu industriel important et programme CNRS « matériaux fonctionnels et procédés innovants ».

### Faiblesses

Manque de coopération et de coordination entre les corps scientifiques.

### Opportunités

Apporter des solutions innovantes aux problématiques des secteurs en aval, maintenir l'activité industrielle en misant sur la technicité, la rupture.

### Menaces

Concurrence internationale forte.

## Recommandations

Le développement de ces matériaux est largement conditionné par la demande, et donc par de nouvelles applications et de nouveaux marchés. Ce développement pourrait ainsi être encouragé en facilitant les démonstrations technologiques et la diffusion des innovations auprès des industriels et du grand public.

L'apport de la chimie est fondamental afin d'amener la fonction au cœur même du matériau. Afin d'assurer la création de matériaux fonctionnels adaptés aux besoins de l'industrie il est nécessaire d'intensifier les collaborations entre les différentes filières productrices et utilisatrices.

De plus, la France doit se positionner clairement pour l'éco-conception de ces matériaux dans le but d'assurer leur recyclage. Cette prise en compte du recyclage dès la conception des matériaux doit être accompagnée par la création d'une filière qui sera en mesure de gérer la fin de vie de ces nouveaux produits. En particulier, la prise en compte des problèmes d'assemblage et surtout du désassemblage reste clé dans l'optique d'assurer un recyclage réaliste (assemblage et désassemblage sont des étapes critiques de l'écoconception).

Il convient également de ne pas perdre de vue les potentialités des produits multimatériaux dans la recherche de matériaux performants.

### Liens avec d'autres technologies clés

2

11

47

68

70

72

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 8. Capteurs

### Définitions

Un capteur est défini comme un système intégré comprenant le moyen de réaliser une mesure. Ce système comprend la détection, la transmission et l'analyse de l'information établie.

Les capteurs ont pour vocation d'être intégrés dans des systèmes complexes tels que les avions, les automobiles, les procédés réactionnels, les chaînes de production, les systèmes de sécurité, la domotique, etc.

### Description

On recense trois types de capteurs :

- les capteurs physiques, mesurent une variation (déplacement, température, lumière, masse...) donnant un renseignement sur l'environnement du capteur. Les technologies de détection associées sont diverses mais la plupart relèvent entre autres des technologies MEMS et NEMS (Micro et Nano *ElectroMechanical System*) ;
- les capteurs chimiques, transforment de l'information chimique en un signal analytique utile. Ils sont composés de deux éléments principaux : un système de reconnaissance et un transducteur de signal ;
- les capteurs biologiques, systèmes de reconnaissance biologique réalisés à l'aide de : biopuces, micro-organismes, ADN... Ils sont perçus comme complémentaires des autres capteurs par leur mesure à l'échelle moléculaire. L'intégration des capteurs dans des matériaux peut être considérée comme une voie technologique pour le développement de matériaux intelligents car ils permettent d'assurer le lien entre le matériau et son monde extérieur et confère ainsi au matériau une capacité d'adaptation.

### Applications

Les capteurs sont nécessaires à tous les marchés industriels : aéronautique, automobile, mécanique, électronique, chimie matériaux, biologie agroalimentaire, construction-BTP, sciences de la vie... Dans ces secteurs, les fonctions associées aux capteurs sont diverses, allant du contrôle de *process* (débit, température, composition), à la sécurité (intrusion-détection) en passant par le suivi des infrastructures et l'environnement (qualité de l'air, économie d'énergie)...

À titre d'exemple, le secteur automobile est fortement consommateur de capteurs (physiques et chimiques). En 2012, le marché des capteurs pour l'automobile est, en effet, estimé de l'ordre de 13,5 Md\$.

Dans le cadre des capteurs physiques, 80 % des capteurs semi-conducteurs dépendaient en 2008 de dispositifs issus des technologies MEMS, en particulier les accéléromètres, les gyroscopes, les capteurs de températures, etc. [12]. Les MEMS constitueront un marché de 19 Md\$ en 2015 selon le cabinet Yole Développement [13]. Ce marché s'ouvre au particulier avec l'intégration de tous types de capteurs dans les objets courants tels que les appareils photographiques ou les téléphones (lumière, son, position, déplacement).

Dans le domaine des capteurs chimiques, au-delà des applications contrôle-sécurité industrielle, d'importants développements ont été effectués pour des applications défense (détection d'explosifs, détection d'armes biologiques ou chimiques). Ce savoir-faire pénètre le secteur

grand public avec le développement de solutions duales comme le « nez électronique ».

### Enjeux et impacts

Les évolutions technologiques s'accompagnent de besoins nouveaux en métrologie. En particulier, les marchés d'application requièrent des capteurs assurant des mesures en continu avec un spectre plus large et une sélectivité plus fine.

En parallèle, il existe un véritable enjeu de miniaturisation et de diminution des coûts de production afin de permettre la diffusion et l'intégration de cette technologie à grande échelle. En particulier, la miniaturisation des capteurs laisse entrevoir la possibilité de réaliser des réseaux de capteurs pour faire de la détection multiparamétrique.

Au-delà du fonctionnement intrinsèque des capteurs, il existe aujourd'hui un véritable enjeu sur la question de l'autonomie en énergie des capteurs. Cette question est cruciale pour des applications de type capteurs déportés. Ces capteurs sont des solutions de choix pour suivre un système à distance, sans le perturber. Cependant, la mesure de tels paramètres exige des temps d'expérimentation longs et en continu. L'autonomie en énergie est également un véritable facteur clé de succès pour une intégration réussie des capteurs dans notre environnement quotidien.

Face à ces différents enjeux, les nanomatériaux apparaissent comme une brique technologique essentielle pour augmenter la sensibilité du dispositif, tout en diminuant la quantité de produits sensibles à mettre en œuvre (réduction des coûts, miniaturisation).

Parallèlement à ces améliorations au niveau des systèmes de détection, il sera également nécessaire, pour obtenir des avancées significatives dans le domaine des capteurs, de travailler sur les systèmes de transduction et de traitement du signal.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA Leti, Lime, CNRS-LAAS
- **Intégrateurs-utilisateurs** : Alpha-Mos, ArcelorMittal, Auxitrol, EFS, Elta-Areva, Hach Lange, Hemodia-Captomed, Heito, Horiba, Humirel, Neosens, PSA, Renault, Sensor, STMicroelectronics, Tronics, Valeo
- **Centres de compétences** : Pôles Axelera, Elopsys, LyonBiopole, Microtechniques, Minalogic, OpticsValley, System@tic, Canceropole Clara

## Position de la France

Avec une cinquantaine de laboratoires travaillant dans le domaine des capteurs, la France apparaît en pointe sur ce sujet au niveau académique. Par contre, il n'existe pas réellement aujourd'hui de filières industrielles « capteurs ». Le tissu industriel est diffus, témoignant d'un manque réel sur cette thématique au niveau industriel : à titre d'illustration, on ne dénombre qu'une petite dizaine de PME dans le domaine des capteurs chimiques. Le manque de sociétés présentant des compétences d'intégration nous positionne en retrait sur ces marchés.

La France doit actuellement faire face à une concurrence croissante des laboratoires de recherche et des industriels américains qui intensifient leurs efforts sur les capteurs chimiques-biologiques (suite à la reconnaissance de la menace bioterroriste). Par ailleurs, l'Europe est également bien positionnée dans ce secteur, avec des acteurs industriels leaders comme Siemens (Allemagne), Applied Sensor (Suède), City Technology (Angleterre).

Pourtant, les opportunités de développement existent puisque la France possède un grand nombre d'acteurs de dimension internationale utilisateurs de cette technologie (secteurs des gaz industriels, de l'automobile...).

Cependant, la situation évolue avec par exemple, au sein du pôle Axelera, la mise en place d'une plate-forme environnement-procédés où utilisateurs et fournisseurs pourront collaborer.

## Analyse AFOM

### Atouts

Nombreux acteurs utilisateurs de la technologie (automobile, chimie, environnement, etc.), des acteurs importants dans la fabrication de MEMS.

### Faiblesses

Pas de leader international, seulement un tissu de PME.

### Opportunités

Développement des matériaux intelligents et des capteurs dans toutes les applications quotidiennes, développement des applications pour la défense et la sécurité.

### Menaces

Développement de solutions bas coût étrangères ; absence de normalisation.

## Recommandations

Le développement des capteurs passe par deux approches :

- assurer la diffusion des solutions existantes mettant en place des plates-formes d'intégration et des démonstrateurs pour faciliter les relations PME-grands groupes ;
  - favoriser le développement de nouvelles générations de capteurs. Dans ce cadre, il y a un besoin de développer des technologies associant MEMS et NEMS pour servir les futurs besoins de capteurs à très bas coûts des applications grand public et, à plus long terme, des technologies NEMS pour des capteurs d'analyse biochimiques.
- Par ailleurs, la diffusion des capteurs auprès des PME implique la mise en place d'un soutien aux PME dans les opérations de normalisation.

## Liens avec d'autres technologies clés

1

7

16

31

82

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 9. Procédés membranaires

### Définitions

Une membrane est une barrière matérielle qui permet le passage sélectif de certains composés sous l'action d'une force agissante. Cette barrière peut être constituée d'un film polymère, céramique ou encore métallique. Il existe plusieurs forces de transfert :

- gradient de pression : microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse et perméation gazeuse ;
- gradient de concentration : dialyse, hémodialyse et membranes liquides ;
- gradient d'activité combinant pression et concentration : pervaporation ;
- gradient de potentiel électrique : électrodialyse conventionnelle, à membrane bipolaire ou encore électro-électrodialyse.

L'évolution des procédés membranaires est encore freinée par les coûts d'investissements qui restent élevés pour une durée de vie limitée des membranes. Le colmatage des membranes est problématique car il entraîne une diminution de l'efficacité du procédé (baisse de flux) et requiert alors des opérations de lavage.

### Description

Les caractéristiques des membranes sont déterminées par deux paramètres : la perméabilité et la sélectivité.

Cependant, toutes les possibilités des procédés membranaires n'ont pas encore été explorées. En particulier, leur couplage avec d'autres procédés de séparation, comme le couplage procédé membranaire-distillation, est un domaine encore relativement peu étudié. On parle alors de procédés hybrides.

Les membranes ont été utilisées de manière historique pour la séparation et la filtration des particules en milieux liquides ou gazeux. Cependant, avec le développement de nouveaux matériaux, elles peuvent aujourd'hui être exploitées en tant que « contacteurs ». C'est alors la capacité des membranes à générer une interface entre des phases, qui doivent échanger de la matière ou de l'énergie, qui est exploitée. Ces interfaces peuvent être aussi utilisées comme « supports de réaction ».

Le développement de l'usage intensif de la simulation, pour prévoir les performances des membranes, est nécessaire afin d'assurer leur développement rapide dans les procédés.

### Applications

De nombreux secteurs requièrent l'utilisation de membranes pour séparer les constituants d'un milieu : l'environnement, l'agroalimentaire, le secteur pharmaceutique, la chimie mais aussi l'industrie du textile, du papier ou encore certains acteurs de la filière métallurgique.

En particulier dans le secteur de l'environnement, les membranes sont un élément essentiel dans le traitement de l'eau et des effluents. Mais elles peuvent aussi assurer la séparation et le traitement de gaz issus de la pétrochimie ou de procédés chimiques. Concernant l'énergie, c'est par le développement de membranes spécifiques que pourra s'amorcer l'essor des piles à combustible.

En 2010, le marché mondial des produits membranaires de microfiltration utilisés dans les séparations liquides a été estimé à 1,2 Md\$. Avec un taux de croissance évalué à 8 % au cours des cinq prochaines années, le marché pourrait atteindre 1,8 Md\$ en 2015.

En particulier, le secteur des bioprocédés et des applications pharmaceutiques connaîtra la croissance la plus rapide. Ce marché, évalué à environ 600 M\$ en 2010, devrait connaître un taux de croissance de 10 % pour atteindre 1 Md\$ en 2015 [14].

### Enjeux et impacts

Au-delà des applications qui permettent de répondre à des enjeux environnementaux, comme le traitement des eaux ou le dessalement de l'eau de mer, les procédés membranaires se retrouvent généralement dans des étapes clés des procédés industriels telles que la séparation, la purification ou la concentration de la matière.

L'utilisation des membranes présente plusieurs avantages, dont un coût d'exploitation modéré, une utilisation réduite d'énergie et un respect plus poussé de l'environnement. En effet, les procédés membranaires sont pour la plupart isothermes et évitent l'ajout de produits chimiques. De plus, ils minimisent les rejets de polluants et facilitent le recyclage intégral.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

- **R&D** : IEM (Montpellier), Insa Toulouse, Université de Paul Sabatier, Inra (Paris, Rennes), Ensic, CEA, IFP, Université de Marseille (Philippe Moulin)
- **Utilisateurs** : Air Liquide, Aqua Source (Filiale Suez), Ceramem (Veolia eau), CTI, Danone, Polymem, Stereau (filiale de La Saur), Tami
- **Centres de compétences** : Pôles Axelera, Trimatec, les pôles EAU (création en 2010, coordination à Montpellier), et l'EMH au niveau européen

### Position de la France

La France est en retard au niveau de la production de membranes. En particulier sur les membranes organiques, où l'industrie française reste absente, à l'image de l'Europe. Toutefois, pour les membranes inorganiques, la France est assez bien positionnée.

De plus, nous bénéficions d'utilisateurs importants en environnement (Veolia et Suez) et en agroalimentaire, où les membranes sont de plus en plus requises (stérilisation membranaire du lait).

La France est en retard sur le transfert industriel des résultats académiques en matière de membranes, bien qu'elles bénéficient d'un potentiel de recherche important.

Cependant, le secteur se dynamise, en particulier avec des initiatives telles que Mem'P (Membranes pour les PME) qui vise à soutenir le développement des technologies membranaires dans des PME.

Cette action de diffusion inédite en Europe peut permettre de replacer la France en tête sur des marchés nouveaux de l'agroalimentaire et de l'eau.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Analyse AFOM

### Atouts

En pointe tant au niveau de la R&D que de l'utilisation des membranes ; bonne position française sur les membranes inorganiques.

### Faiblesses

La majeure partie de la production des membranes est réalisée à l'étranger (en particulier aux USA et désormais aussi en Chine avec des efforts et des capacités de plus en plus marqués).

### Opportunités

Un marché en croissance notamment dans les secteurs des sciences de la vie ; le développement de nouvelles membranes grâce à l'apport des nanotechnologies ; une action collective DGCS (qui s'achève fin 2010) sur les technologies membranaires devrait amorcer un cycle de valorisation de la recherche en milieu industriel.

### Menaces

Manque de connections entre les actions françaises et européennes ; au niveau des PME innovantes le risque est le rachat par les groupes étrangers dès que leur produit semble intéressant. Efforts allemands très importants pour se remettre à niveau en la matière.

## Recommandations

Il est nécessaire de développer les procédés membranaires hybrides (réalisant un traitement du soluté en même temps que la filtration membranaire par exemple).

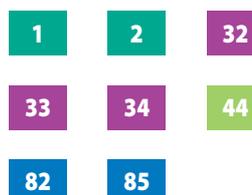
De plus, il s'agit de parvenir à réaliser plus d'échanges entre les milieux professionnels et académiques afin de confronter et rapprocher les envies des laboratoires (avenir) et des industriels (diffusants).

De grandes forces en nanomatériaux existent en France. La complémentarité possible avec les technologies membranaires n'est pas exploitée alors que de nombreuses évolutions de la technologie sont envisageables. Le décloisonnement des secteurs et des recherches est nécessaire. En particulier, l'association des technologies membranaires et des nanomatériaux serait un atout pour le développement de l'intensification des procédés.

La gestion de la recherche et de l'industrie devrait être complètement coordonnée afin que les laboratoires français puissent répondre de manière optimale aux attentes des entreprises. Cela pourrait être mis en place via des comités entre les ministères de la recherche et de l'industrie ou encore avec l'aide d'Oséo.

Au niveau européen, il s'agit de développer les connexions entre les actions européennes et les pôles de compétitivité français. En effet, il n'existe actuellement que trop peu de coordination des pôles avec les politiques européennes. Cela rejoint les recommandations déjà formulées par différents rapports d'évaluation pour une meilleure coordination des actions entre pôles et une ouverture accrue vers l'international. Dans le domaine des membranes notamment, on citera l'axe « membrane » du pôle Trimatec, et les pôles plus utilisateurs comme le nouveau pôle mondial « Eau » ou bien encore Axelera pour la chimie.

### Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input checked="" type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 10. Fabrication rapide

### Définitions

La Fabrication rapide, ou prototypage rapide, regroupe un ensemble d'outils et de technologies de mise en couches des structures et produits. À partir d'un modèle de conception assistée par ordinateur (CAO), il est possible de réaliser tout type d'élément, en particulier avec des architectures complexes.

La pièce est produite par dépôt, polymérisation ou fonte de couches successives de matière première organique, minérale ou métallique. Il est ainsi possible de réaliser des pièces dans les matières habituelles telles que le plastique, la céramique, le métal.

La fabrication rapide intègre l'optimisation de trois notions essentielles :

- le temps, par la réduction des phases de développement des produits ;
- le coût, grâce à des outillages moins onéreux, tout en garantissant les performances du produit final ;
- la complexité des formes, irréalisables par des procédés classiques tels que l'usinage.

### Description

Différentes approches technologiques ont été développées dans le cadre de la fabrication rapide additive. En particulier : la stéréolithographie, la construction laser additive directe ou CLAD, la fabrication d'objets stratifiés ou LOM (*Laminated Object Manufacturing*), la modélisation par dépôt de fil en fusion ou FDM (*Fused Deposition Modeling*), la stratoconception ou encore l'impression 3D.

La prochaine étape clé dans le développement du prototypage rapide est la réalisation de micro-usines personnalisées (MUP). Ces MUP seront utilisables directement par tous les professionnels effectuant du développement de produits et ayant besoin de réaliser des prototypes ou des courtes séries.

Il est important de souligner que le prototypage rapide est étroitement lié à l'essor des technologies d'acquisition des formes en 3D. Des solutions utilisables manuellement, produites par l'entreprise Creaform, leader mondial dans ce domaine, apparaissent au Québec.

### Applications

Les applications peuvent intégrer de nombreux domaines, en particulier l'automobile qui représente 30 % du marché. Les autres secteurs concernés sont l'aéronautique, le biomédical, l'électronique, l'énergie, le luxe, mais aussi les services de production pour les professionnels et les particuliers.

D'autres applications sont aussi possibles en ameublement, chirurgie, arts plastiques, bijouterie ou encore dans la fabrication de jouets.

Bien que souvent associées à la réalisation de prototypes, les technologies de fabrication rapide permettent également de produire des pièces en série. En particulier, pour des applications dans le domaine de la santé telles que les appareillages auditifs ou les prothèses dentaires.

Le marché mondial de la fabrication rapide s'élèverait en 2010 à plus de 1 Md\$, dont 50 % seraient liés aux services réalisés [15].

L'impression 3D enregistre la croissance la plus rapide bien qu'elle ne représente encore qu'un marché de niche (prototypes, création artistique).

### Jeux et impacts

Le développement des nouveaux produits, essentiel pour la compétitivité des entreprises, s'inscrit dans un contexte de marchés évoluant rapidement avec la nécessité d'optimiser les investissements. Une gestion rigoureuse des méthodes de développement de produits s'avère indispensable pour satisfaire les exigences techniques et économiques.

Parmi ces méthodes, l'ingénierie simultanée et concurrente permet le développement conjoint du produit et de ses moyens de production en intégrant le marketing, la recherche, la spécification, la conception et le prototype.

L'avantage de cette technologie est sans conteste la réduction des délais de fabrication. Plus la pièce est complexe et plus la différence avec une fabrication dite conventionnelle s'accroît. De plus, la fabrication rapide apporte de nouvelles possibilités en permettant de réaliser des pièces sans moule ni matrice.

Avec une chaîne numérique continue, la fabrication rapide, au travers des méthodes et des moyens qui y sont associés, permet à l'ensemble des acteurs qui gravitent autour du produit de tester au plus tôt des solutions alternatives (aspect, ergonomie, procédés, optimisation).

Ainsi, la fabrication rapide est un secteur à fort potentiel d'emplois et de création de services pour répondre à des utilisateurs devenus de plus en plus exigeants quant à l'adéquation du produit à leurs attentes.

De plus, étant économe en matière première comparé aux autres techniques de production, la fabrication rapide peut être considérée comme une technologie « propre ».

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA Leti, CNRS Cemes, Cetim (Saint Etienne), UTBM (LERMPS), Cirtes
- **Intégrateurs-utilisateurs** : Acteurs de l'AFPR et CADvision, Kallisto, MG2 Systems, Dassault System, Phenix Systems, Irepa Laser, Phidias
- **Centres de compétences** : Pôles EMC2, Plasturgie, ViaMeca et Manufuture à l'échelle européenne

### Position de la France

La France fait partie des acteurs mondiaux actifs en fabrication et prototypage rapide. En effet, l'Association française de prototypage rapide (AFPR) est membre fondateur de la Global Alliance of Rapid Prototyping Associations (GARPA) qui rassemble à l'échelle mondiale les acteurs du secteur. De plus, les cursus des écoles Centrales et Mines sont à la pointe sur l'utilisation du développement en prototypage rapide ; l'École des mines se concentrant plus sur la recherche et le développement de nouvelles machines.

En France, les entreprises réalisant du prototypage rapide et de la prestation de service en prototypage rapide rassemblent entre 50 et 70 acteurs industriels.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

L'entreprise Phenix Systems, productrice de solutions de prototypage rapide par frittage laser de poudres métalliques, est leader mondial sur son marché. Cependant, seules trois entreprises françaises sont productrices de technologies, bien que notre recherche académique soit bien placée au niveau mondial. En effet, la France est reconnue pour son niveau technologique, l'AFPR et ses membres sont présents dans le septième PCRDT européen pour le *Rapid Manufacturing* (RM) et dans le programme Manufacture.

Cependant, la concurrence s'organise rapidement. À ce titre, on peut noter que le leader mondial américain 3D System a racheté, en 2010, deux entreprises françaises de prestation de services dans le domaine du prototypage rapide. Par ailleurs, le groupe allemand EOS, un des trois premiers acteurs sur le marché mondial, restructure sa production de machines de prototypage rapide vers l'industrie par la réalisation de machines industrielles (création de centres de production européens). Ils sont d'ores et déjà en mesure de proposer des offres spécifiques pour les prothésistes par exemple.

## Analyse AFOM

### Atouts

Position de pointe dans le domaine académique, tissu de PME actives, nombre important d'utilisateurs.

### Faiblesses

Reproductibilité, fiabilité, besoin très important de normalisation, pas de grand industriel français producteur. Le tissu industriel du prototypage rapide français est essentiellement composé de PME et de TPE.

### Opportunités

Des applications très variées, rapidité de fabrication avec tous types de matériaux, fabrication de produits sans frais fixes car la fabrication n'a pas recours aux moules.

### Menaces

Acteurs étrangers s'implantant en prestation de services sur le territoire, rachat des compétences françaises.

## Recommandations

Le besoin majeur de ce secteur est la normalisation. En effet, pour que les techniques de fabrication rapide soient utilisées par les industriels, elles doivent répondre aux contraintes industrielles et être donc normalisées.

Le secteur manque d'une entité structurante poussant le transfert industriel des technologies créées par la recherche académique. Ce pôle actif au niveau pratique serait une vitrine industrielle des capacités existantes en prototypage rapide.

Enfin, il y a un réel besoin de sensibiliser et de faciliter la diffusion de la technologie vers les PME-PMI pour lesquelles la fabrication rapide additive constituerait un outil incontournable.

## Liens avec d'autres technologies clés

67

69

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



# 11. Élaboration de composites

## Assemblage multimatériaux

### Définitions

Le matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles. Trois familles de matériaux composites peuvent être considérées : les composites à matrice organique (CMO), les composites à matrice céramique (CMC) et les composites à matrice métallique (CMM).

Les matériaux composites présentent l'intérêt de combiner des propriétés qu'aucun des composants pris séparément ne peut fournir.

L'engouement pour les matériaux composites repose en partie sur leur capacité à être des matériaux de performance multifonctions (par exemple légèreté et résistance mécaniques pour les applications transport).

La diffusion des matériaux composites dans des applications industrielles repose à la fois sur des innovations au niveau de leur élaboration mais également au niveau de leur assemblage.

### Description

Les évolutions dans l'élaboration de composites concernent l'amélioration de l'évaluation des défauts de structure afin d'assurer durabilité, fiabilité, réduction des coûts, augmentation des cadences de fabrication et accroissement de la complexité des pièces.

Des développements sont aujourd'hui engagés pour insérer des capteurs lors de la réalisation des pièces afin de suivre la régularité de l'évolution du matériau dans le moule, ou de suivre l'état de santé de la pièce lorsqu'elle subit des contraintes. D'autres voies étudiées concernent les fonctions d'auto-cicatrisation ou bien de changement de forme.

Les évolutions des technologies d'élaboration des composites sont en lien avec l'augmentation des préoccupations environnementales. Les réglementations visant à réduire les émissions de composés organiques volatils (COV) favorisent le développement et l'optimisation de nouveaux procédés afin de limiter les dégagements de vapeurs de solvants.

Par ailleurs, le recyclage des produits en fin de vie et la limitation des consommations en ressources non renouvelables sont au cœur des préoccupations. Cela conduit à l'introduction de nouvelles familles de produits comme les biomatériaux : PLA (résine), lin ou chanvre (charges ou fibres végétales...).

Les problématiques de l'assemblage multimatériaux sont en partie liées à l'association des composites avec des matériaux plus traditionnels (aéronautique). Les systèmes multimatériaux sont développés pour répondre aux exigences récentes des marchés (allègement, conductivité, esthétique, recherche de nouvelles fonctionnalités...). La réussite de l'assemblage nécessite de gérer de façon optimale les transmissions de contraintes et/ou les effets mécaniques.

Cela nécessite donc de bien comprendre comment ces différents matériaux fonctionnent. En conséquence, des évolutions sont attendues au niveau du collage (durabilité, fiabilité en milieux sévères...) ou bien au niveau des procédés « physiques » (soudage laser, soudage par friction, par faisceau d'électrons...).

### Applications

Le marché mondial des composites représentait 60 Md€ en 2008 avec un taux de croissance annuelle se situant entre 4 et 5 % (soit un marché de 85 Md€ en 2013). Dans ce marché en croissance, l'Inde et la Chine affichaient des croissances respectives de 14,5 % et 10 % en 2006 [16]. Le marché principal adressé par les matériaux composites à matrice métallique est l'automobile. En effet, ce sont plus de 50 % des composites métalliques qui sont

utilisés dans ce secteur. Suivent les industries électronique et de gestion thermique, l'aéronautique, le ferroviaire, le bâtiment, l'énergie, etc. La production mondiale de CMM était de 4 400 tonnes en 2008. Elle est estimée à 6 000 tonnes pour 2013 [17].

Les composites à matrice organique représentent aujourd'hui les volumes les plus importants à l'échelle industrielle. Au niveau mondial ce sont les marchés de l'automobile, de l'aéronautique et de l'énergie (énergie éolienne) qui vont croître le plus rapidement dans les prochaines années.

### Enjeux et impacts

Les composites répondent aux besoins actuels de nouveaux matériaux à haute performance tout en allégeant au maximum les pièces et tout en étant compétitif économiquement. Dans ce cadre, l'anticipation des performances de ces nouveaux matériaux grâce à la modélisation est clé. En aéronautique, il s'agit de savoir comment réagissent les composites, notamment en cas d'accident. La modélisation est aussi nécessaire pour améliorer la compréhension des comportements des matériaux à la contrainte afin d'assurer une meilleure durabilité et une fiabilité optimale de ces systèmes.

Au niveau des assemblages multimatériaux, les enjeux concernent aussi bien la maîtrise de l'assemblage en lui-même que la gestion des matériaux tout au long de leur cycle de vie. En particulier, la prise en compte des problématiques HSE concernant les colles utilisées en assemblage est actuellement perçue comme un verrou au développement.

Un des enjeux majeur de l'élaboration de composites et de l'assemblage multimatériaux est la prise en compte du recyclage des pièces. En effet, un des freins à l'utilisation des matériaux composites est le manque de filière de traitement ou de valorisation des déchets. Cela conduit parfois les industriels à se tourner vers des solutions plus classiques. Concernant l'assemblage multimatériaux, l'enjeu majeur concerne le désassemblage



#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

pour un recyclage techniquement et économiquement acceptable.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Cetim, IFTH, CLFA, Composites et Systèmes, Creacol, CNRT-Multimatériaux, CTBA, Institut de soudure, Lermab Nancy, Onera, Rescoll, Mines de Douai
- **Intégrateurs-utilisateurs** : Acteurs du GPIC, Airbus, Allibert Equipement, Alstom, Atofina, Axson, Air Liquide Welding, Bostik, Beneteau, Bretagne composites, Compositec, Compreforme, Dassault, DCN, EADS, Faurecia, Hussor, Hutchinson, Inoplast, Natec, Nief Plastic, Peguform, Plastim, Ocean composites, Rhodia, Saint-Gobain, Sogeplast, Sotira, Stratiforme, Stratim, SYMAP, Topflex
- **Centres de compétences** : Pôles Aerospace Valley, Arve Industries, Axelera, EMC2, Matéralia, PPE, PEP

## Position de la France

La croissance du marché français est faible comparée à celle de l'Inde et de la Chine. Cependant, avec environ un millier d'entreprises, majoritairement des PMI, et une filière structurée, la France se place en bonne position au niveau mondial sur les matériaux composites. Cette position résulte également d'un historique important dans l'aéronautique.

## Analyse AFOM

### Atouts

Forte connaissance des composites en particulier grâce au développement du secteur aéronautique français ; expertise reconnue en soudage et collage ; la France était le troisième producteur européen de composites en 2006.

### Faiblesses

Peu de connaissances sur le vieillissement des matériaux et de l'assemblage ; manque de modélisation et pas de filière pour le recyclage.

### Opportunités

Allègement des structures avec conservation des performances ; l'assemblage multimatériaux est une tendance globale du secteur ; nouvelle filière de recyclage à créer.

### Menaces

L'industrie des matériaux composites devra intégrer les contraintes du développement durable à l'horizon 2015 (recyclage automobile) ; forte croissance des productions indiennes et chinoises de composites dont la qualité est croissante.

## Recommandations

La prise en compte du recyclage des nouveaux matériaux composites dès la conception est nécessaire à l'essor de leur utilisation dans tous les domaines d'applications.

Par ailleurs, la réalisation d'un référencement des qualifications des PME offrant des solutions dans ce domaine est nécessaire car ces sociétés souffrent aujourd'hui d'un manque de visibilité auprès des donneurs d'ordre du secteur des transports (aéronautique, ferroviaire...).

Les matériaux composites pourraient bénéficier de la mise en place d'une filière structurée favorisant les rapprochements des PME et des grands groupes et la diffusion des composites dans le tissu industriel régional.

En ce qui concerne l'assemblage multimatériaux, il convient de prévoir le désassemblage dès la conception, faute de quoi le recyclage est impossible. La prise en compte simultanée de l'assemblage et du désassemblage dès la conception est l'un des verrous de l'éco-conception.

### Liens avec d'autres technologies clés

1

8

37

68

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input checked="" type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

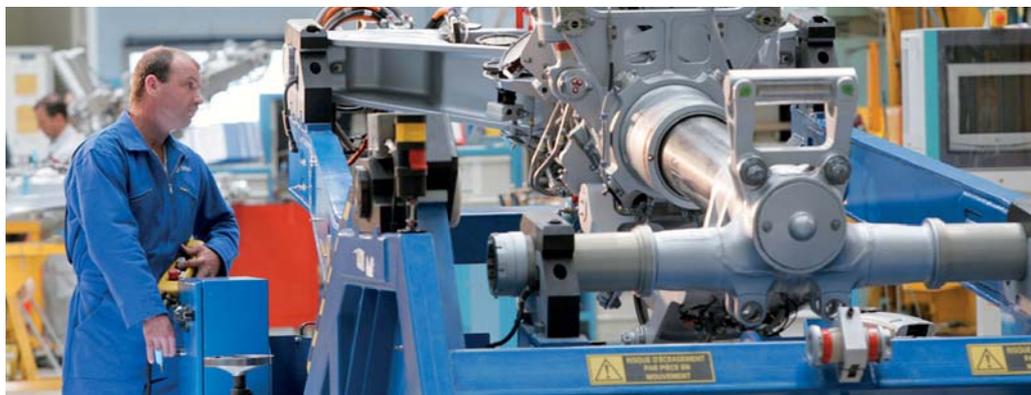
<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 12. Contrôle non destructif

### Définitions

Le contrôle non destructif (CND) est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader. Le CND assure désormais la surveillance des équipements au cours de la production, en cours d'utilisation ou encore dans le cadre d'opérations de maintenance et d'expertise. Le contrôle non destructif rassemble des méthodes et techniques variées de caractérisation et d'analyse des matériaux. Les plus courantes sont : le contrôle par ressuage, la magnétoscopie, les courants de Foucault, la radiographie, la tomographie (scanner 3D), les ultrasons, l'émission acoustique, la thermographie infrarouge, l'endoscopie et l'étanchéité.



### Description

Le développement des nouveaux matériaux, notamment composites, justifie des besoins croissants en contrôle non destructif. En effet, le comportement de ces matériaux vis-à-vis de l'impact, de la présence de défauts et/ou d'endommagements reste parfois méconnu. Les méthodes de CND devront permettre la caractérisation de ces matériaux afin d'assurer la fiabilité et de contrôler les performances des structures et ouvrages les utilisant. Cette technologie s'inscrit ainsi dans une démarche de gestion durable des matériels et installations, et de maîtrise des risques inhérents à leur utilisation.

L'évolution des méthodes de contrôle non destructif passera également :

- par la mise en place de techniques *in situ* et en temps réel. Cela permettra d'évaluer l'endommagement et le vieillissement des structures en continu ;
- par l'exploitation des nouvelles avancées en physique qui pourront être rapidement valorisées en nouveaux capteurs et méthodes de CND (thermoélectricité par exemple).

### Applications

Le contrôle non destructif s'intègre dans les systèmes de surveillance, de pilotage et de maintenance existants. La caractérisation des matériaux par contrôle non destructif présente deux applications principales :

- la détection et le dimensionnement des défauts dans une pièce ou un assemblage ;
- la mesure indirecte des caractéristiques du matériau (résistance, dureté, etc.).

Les secteurs aéronautique-aérospatial et nucléaire sont les premiers utilisateurs de CND. Les autres utilisateurs sont l'industrie automobile, le contrôle des infrastructures, la chimie et la pétrochimie, les industries agro-alimentaires (maintenance prédictive).

En amont des développements industriels des secteurs concernés, il est possible de réaliser des prestations de

services de CND de produits, de caractérisation de matériaux et de maintenance. Ces prestations s'adressent principalement aux industriels, organismes officiels et aux laboratoires de recherche.

Les principaux utilisateurs du CND restent les grandes entreprises, plutôt que les PME-PMI, en raison du coût d'accès à la technologie.

L'enquête menée par la Confédération française pour les essais non destructifs (Cofrend) auprès de ses adhérents en 2007 indique que le CND représente un marché bien supérieur à 300 M€ en France répartis essentiellement entre la vente d'équipements et les prestations de services. La répartition de l'activité est la suivante : prestations et contrôles dans l'industrie (45 %), fabrication et vente d'équipements (21 %), R&D (19 %), formation (15 %) [18].

### Enjeux et impacts

Dans un environnement industriel de plus en plus exigeant en termes de délais, qualité et sécurité, les contrôles non destructifs se révèlent toujours plus nécessaires à la maîtrise de la qualité industrielle. Par ailleurs, les méthodes de CND assurent un gain de temps de contrôle, notamment grâce aux technologies ultrasonores et courants de Foucault multiéléments.

Le CND offre la possibilité de contrôler à 100 % les matériaux de façon automatisée ou robotisée, ou encore dans des zones inaccessibles, ou sur système de surveillance. De la même manière, le contrôle non destructif permet une mesure et un suivi des contraintes.

Le contrôle non destructif est indispensable pour prouver la qualité et la conformité des produits, vérifier la santé matière des équipements et des installations.

De plus, connaître la durée de vie d'un matériau utilisé dans une structure en analysant son comportement est un enjeu majeur pour la maîtrise de la durabilité et de la fiabilité des pièces en service.

Le développement du contrôle non destructif passe

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

également par la mise en place d'offre de services associés (développements de logiciels d'accompagnement), par l'automatisation et l'augmentation du nombre de matériaux pouvant être testés afin de diminuer le coût d'accès à cette technologie.

Les technologies associées au CND sont constamment en développement afin d'accroître les performances des capteurs et la fiabilité des résultats. C'est la raison pour laquelle des méthodes couplant plusieurs des techniques actuelles sont développées. On note à titre d'exemple des recherches concernant les méthodes électromagnétiques acoustiques ou ultrasonores. Sont également étudiés les techniques d'imagerie magnéto-optiques qui se présentent comme une alternative prometteuse aux méthodes de contrôle par courant de Foucault.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA List, Cetim, Cédrat, CTIF, Institut de Soudure, LCPC, Plateforme de recherche ECND-PDL
- **Intégrateurs-utilisateurs** : BabbCo, Cegelec, BFI OPTILAS, EuroMev, GE Inspection Technologies, M2M, Metalscan, Mistras, Olympus, Sofranel, Spectroscan et AREVA, EADS, wncema
- **Centres de compétences** : Aerospace Valley, Matériaia, Cofrend, EMC2, PNB, Xylofutur et l'EFNDT (European Federation for Non-Destructive Testing)

## Position de la France

La France est bien positionnée dans le domaine du contrôle non destructif avec une position très forte du CEA avec son logiciel et un tissu industriel important (grands groupes et une trentaine de PMI). Ce positionnement est renforcé par l'importance des filières aéronautique, nucléaire et composites, premiers utilisateurs de la technologie CND. L'activité CND française rassemble environ 5 000 personnes. D'autre part, sur ce marché, les États-Unis sont également bien positionnés et les pays asiatiques connaissent des croissances de développement importantes.

## Analyse AFOM

### Atouts

Logiciel de simulation Civa développé par le CEA et utilisé par de nombreux acteurs du CND. Dynamisme et innovation de nombreuses PME leaders dans leur segment.

### Faiblesses

Coûts d'acquisition et de mise en œuvre importants. Problèmes de compatibilité des systèmes de commande des robots de positionnement avec les exigences des capteurs de mesure. Pérennité limitée des PME ; beaucoup de matériel nord-américain sur le marché (GE, Olympus).

### Opportunités

CND nécessaire dans de nombreux secteurs (automobile, aéronautique, bâtiment, etc.) et se révèle indispensable pour maîtriser la durabilité et la fiabilité des matériaux-structures. Développement et diffusion de l'automatisation et de la robotisation du CND. Les nouvelles possibilités de traitement du signal et les méthodes multiéléments permettront d'élargir le champ des applications du CND (exemple retournement temporel, non linéarité acoustique). Diffusion large des outils de modélisation et de simulation du contrôle. Développement de nombreux nouveaux capteurs innovants (imageurs magnétiques, capteurs flexibles). De plus, les industries les plus consommatrices de CND sont très présentes en France.

### Menaces

Certains pays européens investissent massivement dans la R&D : Grande-Bretagne (avec un équivalent ANR dédié au CND), Allemagne. Difficultés liées à la petite taille des PME du secteur. Développements bon marché venant de Chine ou de Corée.

## Recommandations

Il est nécessaire de réaliser une veille technologique poussée concernant les progrès des méthodes et des capteurs. Par ailleurs, ces évolutions technologiques et la complexification des problématiques industrielles nécessitent du personnel de plus en plus compétent.

La diffusion des technologies de contrôle non destructif peut être assurée via le développement de démonstrateurs et par la formation des utilisateurs industriels afin de soutenir et favoriser la mise en place de plates-formes technologiques à l'image du Centre de contrôle non destructif pour matériaux composite (Iseetech) inauguré en 2007.

Concernant les normes associées au CND, il s'agit de réaliser un accompagnement et un suivi des actions normatives, afin d'intégrer les exigences mécaniciens dans les textes futurs.

### Liens avec d'autres technologies clés

11

47

67

68

#### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

#### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

#### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## BIBLIOGRAPHIE

### Monographie :

#### Analyse de la position de la France

[1] Observatoire des sciences et des techniques, rapport biennal, 2008

### Technologies clés :

#### 1. Nanomatériaux

[2] Étude du cabinet Lux Research, 2007  
[3] NSF : *Societal Implications of Nanoscience and nanotechnology*, NSF, 2000, <http://www.wtec.org>  
[4] The Woodrow Wilson Center, *The project on emerging nanotechnologies*, <http://www.nanotechproject.org>

#### 2. Simulation moléculaire

#### 3. Biotechnologies blanches

[5] *Etude McKinsey*, 2006

#### 4. Microstructuration

[6] Étude Alcimed : *Les microréacteurs, opportunités et applications pour les industries chimiques*. 2006  
[7] *Microreactor technology : a revolution for the fine chemical and pharmaceutical industries*, Chem. Eng. Technol. 2005

#### 5. Catalyse

[8] *Catalyse, la chimie fine révisé ses réactions*, Industrie Pharma n°45, 2009  
[9] *Les métaux précieux. Cotation or, argent, platine et métaux précieux*, 2010. [www.orargent.com](http://www.orargent.com)

#### 6. Dépôt de couche mince

[10] Rapport de BCC Research. *Thin-layer Deposition: CVD*, 2008. [www.bccresearch.com](http://www.bccresearch.com)

#### 7. Matériaux fonctionnels, intelligents et de performance

[11] *Textiles Techniques, le futur se tisse en France*, DGE/UBIFRANCE, France, 2006

#### 8. Capteurs

[12] Eetimes. *Huge growth seen for MEMS sensors, actuators*, 2008. [www.eetimes.com](http://www.eetimes.com)  
[13] Étude Yole Développement. *Mems&Sensors*, 2010

#### 9. Procédés membranaires

[14] BCC Research. *The Global Market for Membrane Microfiltration*, 2010. [www.bccresearch.com](http://www.bccresearch.com)

#### 10. Fabrication rapide

[15] Wohlers Associates, *Wholers Report 2010*, Monde, 2010

#### 11. Élaboration de composites - Assemblages multimatériaux

[16] *Jec Composites : une filière sur la voie de la maturité*, 2010. [www.usinenouvelle.com](http://www.usinenouvelle.com)  
[17] BCC Research, *Metal Matrix Composites : The Global Market*, 2009. [www.bccresearch.com](http://www.bccresearch.com)

#### 12 : Contrôle non destructif (CND)

[18] Cofrend, *Enquête auprès des adhérents*, 2009

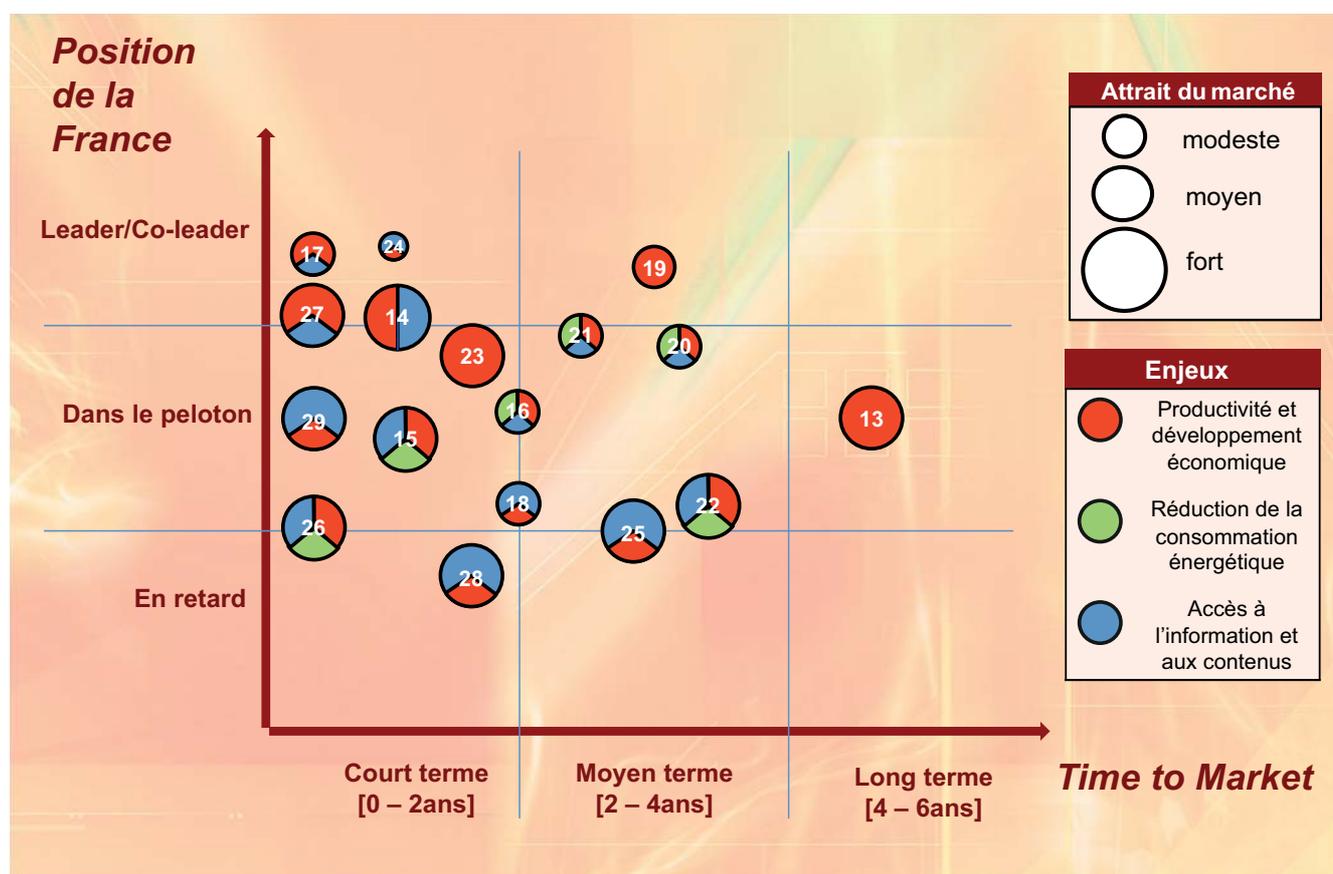


# Technologies de l'information et de la communication



# Technologies de l'information et de la communication

- 13. Robotique
- 14. Technologies réseaux sans fil
- 15. Réseaux haut débit optiques
- 16. Objets communicants
- 17. Technologies 3D
- 18. Interfaces homme-machine
- 19. Ingénierie de systèmes complexes et systèmes de systèmes
- 20. Calcul intensif
- 21. Progressive/Intelligent Manufacturing
- 22. Optoélectronique
- 23. Nanoélectronique
- 24. Technologies de numérisation de contenus
- 25. Sécurité holistique
- 26. Virtualisation et informatique en nuages
- 27. Logiciel embarqué et processeurs associés
- 28. Valorisation et intelligence des données
- 29. Portail, collaboration et communications unifiées



## Contexte et enjeux

Le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC) est devenu un segment majeur de l'économie des principaux pays industrialisés avec une contribution directe de 5,9 % du PIB en Europe (et 7,5 % aux États-Unis). Au-delà du secteur lui-même, les TIC contribuent au développement de tous les autres secteurs économiques, les TIC représentant en effet plus de 50 % de la croissance de la productivité en Europe (source : Commission Européenne).

Le développement du secteur des TIC s'est appuyé sur de grandes évolutions économiques structurantes. Les économies d'échelle et les progrès technologiques obtenus dans le cadre de la fabrication des composants et des terminaux qui permettent d'une part, de réduire les coûts unitaires et d'attirer logiquement plus d'utilisateurs, et d'autre part, d'en accroître fortement les performances (Loi de Moore : doublement des performances tous les deux ans depuis trente ans). La révolution numérique, avec la numérisation accrue des contenus et services et le développement de l'internet, a permis par ailleurs d'étendre très largement la diffusion des TIC au-delà des grandes entreprises auprès du grand public et des PME.

Les technologies numériques et IP (*Internet Protocol*) permettent de promouvoir de nouveaux modèles économiques (micro-paiement en ligne, abonnement illimité, etc.) ou d'améliorer considérablement les modèles existants (mesures statistiques dans la publicité, etc.). L'abonnement est particulièrement répandu dans les services TIC, permettant de réduire le risque de l'investissement initial et de garantir des revenus récurrents. Les TIC profitent ainsi des caractéristiques intrinsèques du numérique impliquant des coûts marginaux de stockage ou de duplication de l'information quasi nuls et de coûts de traitement et de communication très faibles.

Il est donc possible de bénéficier de coûts de transaction très faibles sur Internet (en comparaison des solutions hors ligne) et de proposer une combinaison à faible coût de différents contenus et services numériques, et de leurs données associées. Il s'agit ainsi de réutiliser des données ou informations déjà existantes en provenance de tiers (services commerciaux, services publics, etc.) sans avoir à recréer de zéro les données. La réutilisation de ces données, notamment les données personnelles, est donc au cœur des enjeux économiques pour diminuer le coût de développement des services. Elle soulève toutefois aussi des questions sur les limites des usages de ces données, encadrés en France par la CNIL. Les capacités de copie des données (brutes et contenus numériques) sont par ailleurs à mettre en balance avec le respect de la propriété intellectuelle.

Les TIC permettent aussi de répondre au moins en partie à de grands enjeux sociétaux comme notamment l'amélioration de la qualité de vie via l'accès et l'échange d'information, le développement durable (via la limitation des déplacements grâce aux échanges distants), la conservation du patrimoine ou encore la fourniture d'outils permettant d'accélérer le développement de nouveaux modèles d'innovation ouverte (*open innovation*). Ainsi l'APIE (Agence du patrimoine immatériel de l'État) numé-

rise ce patrimoine dans les différents ministères pour le pérenniser, mais le met aussi à disposition d'entreprises pour qu'elles créent de la valeur sur cette base, à l'instar de Lexsi.

Cette transversalité des TIC a été comprise par les différents acteurs du marché et les pouvoirs publics avec la création d'Allistene, alliance visant à décloisonner la recherche dans les TIC. Les modèles d'innovation ont en effet fortement évolué durant ces dernières années. La recherche dans les TIC a longtemps été structurée autour de grands laboratoires privés ou académiques et des initiatives publiques (CEA, Plan Calcul etc.), concentrant alors l'essentiel des ressources financières et des connaissances techniques. Avec la plus grande diffusion de la connaissance, la mobilité des travailleurs et l'appui de nouvelles sources de financement (capital-risque, etc.), la recherche s'est en partie déconcentrée. Si les innovations incrémentales sont encore développées par les laboratoires des grands groupes, les innovations de rupture viennent de plus en plus souvent de petites sociétés qui travaillent avec des laboratoires publics. Par ailleurs, le développement de certaines innovations, dans des cycles de vie de produits parfois très courts, est parfois extrêmement coûteux et/ou implique de nombreuses connaissances techniques alors qu'il est impossible de disposer de toutes les expertises. L'innovation nécessite donc une plus grande collaboration entre les différents acteurs.

Le secteur des TIC recouvre l'ensemble des filières relatives aux technologies, aux contenus et aux services numériques, soit :

- l'électronique industrielle et les composants ;
- l'électronique grand public, les équipements audio et vidéo par exemple ;
- le matériel informatique : serveurs, PC et périphériques, équipements de transmission de données ;
- les équipements de télécommunication : équipement de réseaux, terminaux, logiciels et services associés ;
- les logiciels et les services informatiques embarqués, infrastructure ou applicatifs, professionnels et grand publics (dont notamment jeux vidéo) ;
- les services Internet logiciel comme les moteurs de recherche ou les réseaux sociaux ;
- les services de télécommunication : téléphonie fixe et mobile ; transmissions de données ;
- les services et contenus multimédia : télévision, vidéo, cinéma, musique numérique, radio, livre numérique, etc. ;
- la simulation, la modélisation et le calcul intensif.

Selon l'Idate, le marché mondial des TIC a pesé 2 791 Md€ en 2009.

Tableau 1 : Marché mondial des TIC

Md€	2007	2008	2009	2010
Services de télécommunication	928	963	980	1 007
Équipements de télécommunication	225	237	226	236
Logiciels et services informatiques	605	636	619	625
Matériels informatiques	293	302	280	280
Services audiovisuels	258	272	269	282
Électronique grand public	242	259	254	254
Électronique industrielle et composants	184	194	163	209
Total	2 735	2 863	2 791	2 893

Source : IDATE, PAC et WSTS

Le secteur des TIC n'a pas échappé à la crise mondiale, accusant un recul de l'ordre de 1,6 % au niveau mondial (après des croissances de 4 à 7 % par an les années précédentes). Seuls les marchés émergents (qui pèsent environ 25 à 30 % des marchés TIC) ont affiché une croissance en 2009.

La plupart des sous-segments des TIC ont logiquement accusé une décroissance en valeur en 2009 tout en affichant toutefois de (parfois fortes) croissances en volume. Les perspectives restent cependant positives pour le secteur des TIC, avec une croissance attendue de 3,8 % par an d'ici à 2013.

## Les équipements de télécommunication

Les équipementiers répondent aux évolutions des réseaux fixes et mobiles par de nouveaux équipements toujours plus performants. Toutefois, la pression sur les prix reste forte en raison notamment de la crise et de mouvements de consolidation chez les opérateurs. Le segment des équipements télécoms a été l'un des plus affectés par la crise, avec un recul de 6 % en 2009.

La concurrence des acteurs chinois (ZTE, Huawei) et des acteurs comme Cisco et HP est par ailleurs de plus en plus forte et l'industrie ne compte désormais plus que quelques acteurs mondiaux, dont notamment le franco-américain Alcatel-Lucent et les européens Nokia, Siemens Network et Ericsson.

Les équipementiers s'adaptent aux exigences des opérateurs, désormais plus sélectifs, cherchant à réduire leurs coûts et à gagner en efficacité. Les dépenses s'orientent ainsi majoritairement vers les infrastructures tout-IP et les services managés. Les contrats d'externalisation des réseaux et de partage des infrastructures se multiplient, offrant un nouveau rôle aux équipementiers.

## Les équipements informatiques

Tout comme les équipementiers télécoms, les équipementiers informatiques sont engagés dans une course permanente à la performance stimulée par la pression sur les prix. La crise les a lourdement affectés avec une décroissance de près de 8 % de leurs revenus.

Le marché du matériel informatique reste très largement dominé par des constructeurs-assembleurs américains (HP, IBM, Dell, Apple...), leurs deux compétiteurs asiatiques (Lenovo, Acer) et quelques spécialistes locaux (Hitachi, Fujitsu-Siemens, Bull...). La plus grande partie des composants est fabriquée en Asie, en particulier à Taïwan.

Le marché se décompose en quatre types de matériels :

- les clients, les PC, les Mac, les terminaux passifs ;
  - les serveurs, le plus souvent sous OS Linux, Unix ou Windows, pour gérer centres de données et applications ;
  - les macroordinateurs ou serveurs centraux transactionnels, marché dominé par IBM, souvent le point central du système d'information d'un grand compte ;
  - les supercalculateurs, dévoués au calcul à haute intensité, en particulier dans les domaines scientifiques et militaires.
- Le marché se banalise fortement avec une demande qui, sous l'effet de l'informatique en nuage, s'oriente vers des centres de données automatisés et mutualisés reposant sur des matériels standardisés. De ce fait, la croissance attendue du marché d'ici à 2014 ne sera guère que de 1% par an.
  - L'autre changement majeur est la fusion progressive des marchés télécoms et informatique, une situation d'autant plus accentuée par l'utilisation croissante du *Cloud Computing* et des divers appareils mobiles. Ainsi, Cisco est rentré dans le marché des serveurs informatiques avec UCS (systèmes réseaux et informatiques intégrés pour centres de données) et HP a racheté 3Com, un concurrent l'Alcatel-Lucent.

## Les services télécoms

Le marché mondial des services télécoms (voix et données sur réseaux fixes et mobiles) est celui qui a le mieux résisté à la crise avec une croissance de l'ordre de 2 % au niveau mondial en 2009. Cette résistance forte provient notamment des pratiques d'abonnement très répandus sur le fixe comme sur le mobile. Toutefois, la plupart des marchés les plus avancés (sauf États-Unis, France et Corée du Sud) ont vu leurs revenus baisser en 2009.

Les marchés traditionnels de téléphonie sont en déclin, à l'instar de la téléphonie fixe. Les services mobiles, tirés par les développements dans les pays émergents, représentent d'ailleurs désormais la plus grande partie du marché (54 % des télécoms). De nouveaux marchés viennent toutefois prendre le relais des technologies traditionnelles, avec notamment le transfert vers l'IP autour du développement de la voix sur IP et de l'internet mobile, et surtout de l'accès haut débit (près de 20 % du marché total des télécoms).

Les marchés en Europe sont dominés par quelques acteurs paneuropéens (France Telecom, Telefonica, Vodafone, etc.) et des acteurs essentiellement locaux (Free, Bouygues Telecom, Fastweb, etc.).

Les opérateurs télécoms se sont engagés dans de nombreuses diversifications distribuées notamment dans leurs offres multi-produits (*triple play*, etc.), allant même jusqu'à proposer des services de contenu ou des solutions appliquées à d'autres industries (santé, énergie, etc.). Ces initiatives restent encore modestes en termes de revenus générés, mais illustrent les capacités d'innovation transversale des opérateurs autour de l'internet.

Si la dynamique des services télécoms reste forte, elle ne bénéficie toutefois que peu aux opérateurs télécoms et aux acteurs français, en dehors des services d'accès au réseau. Les acteurs dominants sur le service sont en effet le plus souvent des acteurs

nord-américains issus directement ou indirectement de l'industrie logicielle (Google, Facebook, Amazon, etc.). Grâce à l'internet, n'importe quel acteur peut en effet adresser à distance le marché mondial des services.

## Les services et contenus médias

Le secteur des médias et des contenus accélère sa migration vers l'internet, aussi bien dans les solutions ouvertes que sur les services managés des opérateurs (télévision sur IP, etc.). Le marché mondial n'a pas échappé à la crise avec un recul par exemple des services de télévision de 1,2 % en 2009, notamment du fait de la baisse de la publicité (- 9,5 %). Le marché doit aussi faire face à des difficultés plus structurelles avec une destruction de valeur avec le passage au numérique (découplage, piratage, etc.).

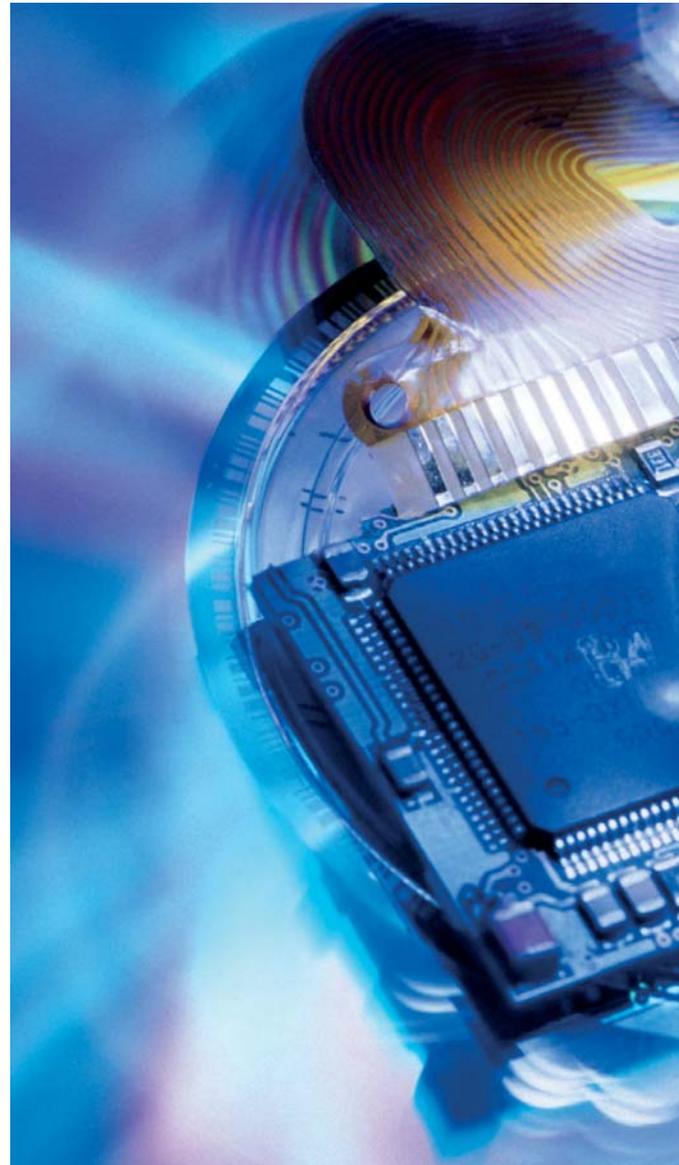
Le secteur de la vidéo s'organise différemment en fonction de la nature des contenus. Les contenus de qualité (dits premium), via par exemple la télévision à péage ou plus marginalement par la vidéo à la demande autour des films, des séries ou du sport, bénéficient encore d'une forte croissance et génèrent des revenus élevés. Les autres contenus sont monétisés par la publicité, qui bénéficie essentiellement aux plus gros acteurs et reste très dépendante de l'environnement économique global mais aussi des évolutions des différents supports de publicité (média, hors média, etc.). Le développement de solutions de télévision de rattrapage (*catch-up TV*), offerte par de nombreuses chaînes et opérateurs, offre aussi de nouveaux relais de croissance pour le développement de la publicité.

Enfin, si les contenus générant des revenus importants sont encore fortement d'origine professionnelle, la production de contenus amateurs et/ou personnels est devenue très forte en volume, entraînant une forte explosion du contenu disponible et consommé.

Les marchés européens sont généralement dominés par des acteurs essentiellement nationaux (TF1, BBC, etc.) en ce qui concerne la diffusion des contenus (radio, télévision, presse numérique, etc.) et la production locale. Les acteurs nord-américains jouent toutefois un rôle majeur dans la production de contenus (films, séries, musique, etc.), avec une diffusion quasi mondiale permettant de disposer de ressources accrues, qui sont ensuite en partie investies dans des technologies de pointe. Des acteurs majeurs locaux sont par ailleurs bien positionnés sur la distribution de contenus numériques avec un rayonnement international comme Dailymotion, Deezer, Spotify.

## Les services Internet

L'usage du Web sur fixe et plus récemment sur mobile (via un navigateur web ou des applications) est désormais ancré dans le marché de masse, les plus jeunes passant même désormais plus de temps sur Internet que devant le téléviseur. Les services comme la messagerie électronique, les moteurs de recherche, le commerce électronique, les réseaux sociaux ou la vidéo en ligne sont particulièrement populaires.



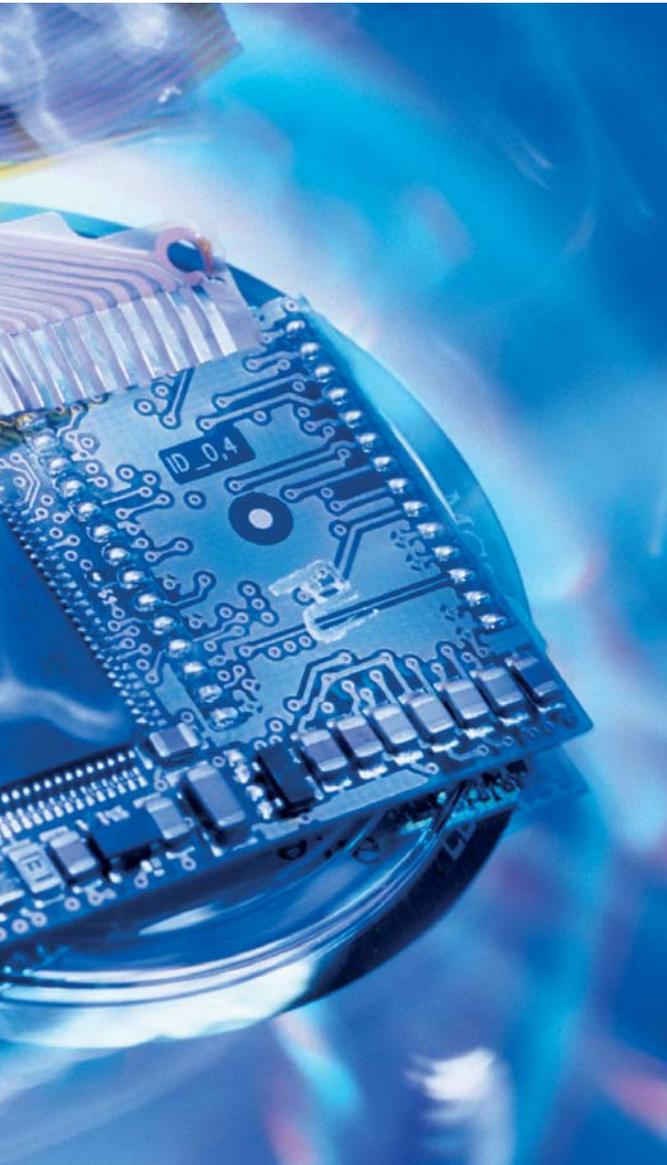
Internet se développe notamment grâce aux différents modèles publicitaires d'affichage (*i.e.* publicité média) et de liens sponsorisés (*i.e.* publicité hors média ; Google étant la référence sur ce dernier point talonné par Facebook), combinant ainsi des outils statistiques avancés de mesure de la performance avec des services populaires générant de nombreuses données et de pages vues.

Le marché de la publicité en ligne a été affecté par la crise mais reste en bonne croissance (+12 % malgré la crise). Disposant des services les plus populaires, les acteurs nord-américains dominent le marché en ligne.

## La publicité

La publicité n'est pas à proprement parler un segment du secteur TIC, mais un des modèles économiques majeurs, notamment pour les médias et le Web. La croissance du temps passé sur les différents supports permet d'ailleurs de proposer désormais des solutions transverses à différents supports.

Le marché de la publicité qui permet de créer de la notoriété autour de ses produits et services ou de générer des ventes est très directement lié à la bonne santé économique des annonceurs de tous les secteurs. La crise économique s'est matérialisée par un déclin de nombreux marchés publicitaires (TV, presse,



amplifié par une migration vers l'internet.

Au-delà de l'impact en termes de revenus, l'internet a des conséquences directes sur le marché de la publicité traditionnelle qui en adopte de plus en plus les principes (outils, mesure de la performance, etc.).

Dans le domaine des régies et des agences publicitaires, que ce soit sur des supports média traditionnels ou numériques, la France dispose d'acteurs de référence comme Publicis.

### Les logiciels

Le segment du logiciel est celui où la valeur ajoutée est la plus forte. Mais, à l'instar d'un grand nombre de segments informatiques, il se banalise et se consolide assez vite. Simultanément, le logiciel apporte une valeur ajoutée de plus en plus importante au sein d'autres industries : il représente ainsi 30 % de la valeur ajoutée d'un A 380 d'Airbus et jusqu'à 20 % de la celle d'une Série 7 de chez BMW.

Ce marché se segmente en trois niveaux selon le niveau de valeur ajoutée et les volumes (son corollaire, qui y est inversement proportionnel) :

- logiciels banalisés (navigateurs, bureautique, utilitaires...);
- progiciels (SAP, Catia, Oracle BD...);
- développement spécifique (avionique, systèmes de *scoring* financier...).

Ce marché est structuré en couches, dont les plus hautes, celles avec qui interagissent les utilisateurs, dépendent des couches les plus basses. Ces couches sont :

- les logiciels applicatifs, qui sont utilisés par l'utilisateur final (métier, progiciels intégrés, bureautique...);
- les logiciels outils, qui servent à développer et gérer les applications et les données;
- les logiciels systèmes, qui servent à opérer et gérer les matériels informatiques.

Ce marché, comme bien d'autres, a été révolutionné par l'arrivée concomitante d'Internet et de la « serviciation ». Internet a permis l'éclosion de concepts comme l'informatique en nuages, le logiciel libre mais aussi une distribution toujours plus poussée du calcul et du stockage. Cette même distribution s'est trouvée être le cœur des architectures orientée services ou SOA en anglais, le modèle actuel du développement logiciel, celui où le logiciel est « servié ».

SOA, l'informatique en nuage et logiciel libre redistribuent les cartes sur un marché qui devenait oligopolistique et très largement dominé par les entreprises américaines, en particulier sur les couches d'infrastructures (nécessaires aux applications) ou *middleware*, c'est à dire les logiciels outils et systèmes. Ces trois concepts peuvent être des moyens forts pour que l'Europe et la France en particulier, comble leur retard.

La crise a vu le marché se contracter de 5 % en 2009, mais le taux de croissance annuel moyen pour les années à venir devrait tourner aux alentours de 3 à 5 % en France et en Europe de l'Ouest.

### Le jeu vidéo

Le jeu vidéo représente l'essentiel du marché grand public du logiciel, avec environ 5 % du marché du logiciel (environ 38 milliards d'euros en 2010). Il a ainsi dépassé le marché mondial du cinéma.

L'évolution du marché est très liée aux phénomènes cycliques d'apparition de nouvelles plateformes (Wii, PS3, etc.), mais la croissance reste forte grâce aux développements sur de nouveaux supports : jeu sur mobile et jeu en ligne (des jeux massivement multijoueurs aux jeux basiques financés par la publicité en passant par les mondes virtuels et les jeux sur réseaux sociaux).

Près de 40 % des revenus de l'industrie proviennent désormais de solutions dématérialisées. La dynamique reste globalement forte pour la partie logicielle, alors qu'elle est plus mitigée pour les ventes de matériel, les consoles étant concurrencées par des terminaux non dédiés (téléphone mobile, tablette, etc.).

Le jeu vidéo est un secteur majeur en termes d'innovations, avec des retombées dans les autres secteurs, autour par exemple de la 3D (moteur, etc.) ou des interfaces hommes-machines.

### Les services informatiques

Les services informatiques sont très liés aux autres segments de l'informatique et notamment à celui du logiciel. Ainsi, le service informatique a suivi toute les vagues technologiques :

avènement du PC, Unix, arrivée des progiciels de gestion, vague Internet, SOA et maintenant l'informatique en nuage. Ces technologies, en devenant de plus en plus proches des besoins métiers, incorporent de plus en plus de services informatiques. Par conséquent, le service informatique n'a cessé d'augmenter sa part dans la dépense informatique globale des entreprises en passant de 29 % du marché IT total en France en 2000 à 36 % en 2009 (source PAC).

Les services autour des technologies de l'information représentent 350 000 emplois, soit les trois quarts des emplois de la filière TIC d'après le Syntec. C'est une filière très diplômée : 62 % de bac + 3, voire à 42 % de bac + 5. Cette tendance se renforce et les qualifications sont de plus en plus duales avec l'ajout de compétences métiers.

Les services informatiques se décomposent en plusieurs phases :

- amont (conseil, définition, conception...);
- projet (intégration, forfait, assistance, formation...);

- aval (maintenance, infogérance...).

On peut aussi segmenter les services informatiques, comme le logiciel, en trois segments selon leurs utilisations :

- applications ;
- outils ;
- systèmes.

On différencie aussi l'informatique de gestion de l'informatique scientifique, technique, industrielle et embarquée (STIE). Ce dernier segment est une spécialité française et est très lié aux secteurs clients : aérospatial, défense automobile, finance, télécoms... Des secteurs industriels où la position de la France est bonne, voire excellente.

Les services sont généralement liés aux technologies logicielles à des niveaux variables selon les technologies en question, leur banalisation, leur personnalisation et le niveau de complexité. Au niveau du marché, un euro de licence logicielle génère en moyenne cinq euros de services. C'est un marché important : en France le marché des services informatiques pèse près de 25 Md€ (source PAC).

La crise a impacté sévèrement ce marché avec une décroissance de 3 % en Europe de l'Ouest. Cependant, malgré la pression sur les prix exercée, les délocalisations (Inde, Europe de l'Est, Maghreb...) et l'informatique en nuage, ce marché va rester dynamique sur le long terme. En effet, l'évolution démographique va raréfier les compétences alors que celles-ci, dans le même temps, évoluent fortement vers des expertises technologiques pointues ou des expertises duales, métier et informatique. Cette montée en compétence est essentielle pour la compétitivité de la branche qui est soumise à la fois à la pression des délocalisations vers des destinations moins chères (comme l'Inde ou le Maghreb) et à celle de l'automatisation croissante des logiciels et des matériels dont le résultat le plus visible est l'informatique en nuage.

La formation est un point clé dans la compétitivité de ce segment dans le futur.

Services, logiciels et matériels sont très fortement liés et peuvent difficilement exister séparément. Ainsi tout investissement dans des technologies de pointe, comme par exemple la valorisation et l'intelligence de l'information, impactera directement et fortement les services associés : audit, conseil, conception, développement, intégration, déploiement, maintenance, optimisation... Par ailleurs, certaines technologies comme la robotique doivent pour s'imposer en France accroître le nombre d'intégrateurs et de compétences en services.

## L'électronique industrielle et les composants

Le chiffre d'affaires des fabricants français de composants a chuté de 13 % en 2009, dans les mêmes proportions que le marché mondial. Le secteur, fortement dépendant de la conjoncture, a subi de plein fouet les effets de la crise économique mondiale. En effet, il a été frappé par l'assèchement des commandes en provenance des secteurs clients majeurs (tels que l'automobile par exemple). Il est cependant reparti



en 2010, du fait notamment d'un fort rattrapage du faible niveau d'activités de l'année précédente (déstockage, etc.).

Le secteur des composants électroniques inclut les composants passifs (condensateurs, *self*, résistances, circuits imprimés, ...) et les composants actifs (puces électroniques). Ces derniers représentent plus de 90 % du chiffre d'affaires des fabricants français. Il s'agit d'un segment totalement mondialisé, en croissance régulière de 6 % par an mais très cyclique (le chiffre d'affaires, de 270 Md\$ en 2008, est tombé à 226 Md\$ en 2009 et devrait dépasser 300 Md\$ en 2011 d'après le WSTS).

Il est caractérisé par des coûts d'investissement industriel et de R&D considérables, conduisant à une concentration progressive sur quelques acteurs mondiaux (Intel, Samsung, Toshiba, Texas Instruments, TSMC, STMicroelectronics...) et à une séparation graduelle entre activités de conception et activités de fonderie afin d'en partager les coûts – bien que la maîtrise des deux par une même société confère des avantages compétitifs (exemple Intel, Samsung).

### L'électronique grand public

Comme pour les équipements télécoms, la crise a impacté le secteur de l'électronique grand public (EGP) en 2009 avec un recul de 2 % en valeur, malgré une forte progression en volume des ventes de nouveaux terminaux, autour notamment des écrans plats, des lecteurs DVD *Blu-Ray* et des *smartphones*, ainsi que dans une moindre mesure en volume des liseuses de livres électroniques ou des téléviseurs connectés.

La concurrence sur les prix reste forte, notamment du fait de la banalisation et de la concurrence asiatique, même si des acteurs nord-américains restent engagés sur du haut de gamme (Apple, RIM, etc.). Les acteurs européens majeurs sont peu nombreux en dehors de Nokia sur les téléphones mobiles et de quelques acteurs comme Archos sur les lecteurs multimédias ou Bookéen sur le livre numérique.

Les terminaux sont de plus en plus sophistiqués, avec de nombreux composants permettant des usages multimédias tout en étant connectés à Internet en permanence. De nombreux capteurs (géolocalisation, RFID, grandeurs physiques, biologiques, etc.), éventuellement utilisés en réseaux, permettent par ailleurs de collecter des informations supplémentaires sur leur environnement direct.

La connectivité intégrée (éventuellement sans fil) à ces terminaux permet d'acquérir directement des contenus et services, de plus en plus via des plates-formes associées, entraînant une nouvelle organisation dans l'approche de la chaîne de valeur.

### Un environnement économique et écologique en pleine évolution

Après des années de très forte croissance, le secteur des TIC ne progresse plus qu'au même rythme que le PIB dans les pays avancés, sauf pour les segments logiciels et services informatiques, qui sont généralement sur un multiple de 2 à 2,5 fois le PIB. Bien que le secteur des TIC dispose encore de plusieurs segments susceptibles d'agir en tant que relais de croissance,

on cherche désormais à s'adapter à la contrainte économique par une meilleure maîtrise des coûts (CAPEX et OPEX), notamment chez les opérateurs télécoms.

Dans les pays émergents, notamment en Chine (pour les télécoms) ou en Inde (pour l'informatique), la croissance du secteur TIC reste forte. Cette dernière s'appuie notamment sur un marché intérieur gigantesque comme futur relais de croissance, un fort retard au niveau du taux d'équipements, comme d'ailleurs dans tous les pays émergents, et une économie numérique tournée vers l'exportation. Ce phénomène de globalisation, présent dans d'autres industries, a des répercussions majeures à la fois sur l'industrie et sur les marchés. De nouveaux industriels majeurs issus des pays émergents deviennent concurrentiels. Les consommateurs et/ou les autorités nationales impactent directement la conception des nouveaux produits, aussi bien en termes de standards, de fonctionnalités que de prix des produits. Pour répondre aux attentes des pays émergents, il faut en effet pouvoir être compétitif en termes de prix.

Dans les deux cas, pays émergents et pays avancés, les cycles d'innovation deviennent de plus en plus courts, avec notamment un remplacement rapide des terminaux d'électronique grand public. Ceci impose aux acteurs des évolutions dans leurs approches de l'innovation et des coûts associés.

L'industrie des TIC repose par ailleurs de plus en plus sur des revenus issus de la monétisation des produits grand public, via notamment des transferts des autres industries (loisirs, culture, commerce, etc.). En dehors de quelques applications phares (moteur de recherche, commerce électronique, annuaires, etc.) s'appuyant sur des modèles déjà bien établis (publicité, micro-paiement, etc.), les revenus unitaires générés autour d'un service donné sont encore faibles.

Dans un contexte de probable augmentation des coûts de l'énergie, les acteurs prennent ainsi de plus en plus en compte le coût économique des consommations énergétiques des grandes infrastructures TIC (*datacenters*, réseaux, serveurs *cloud*, etc.) et déploient des solutions plus vertes (*green ICT*), répondant par extension aux contraintes environnementales.

Les TIC peuvent en effet avoir un effet de levier considérable autour des problématiques de développement durable et contribuer à une réduction des émissions carboniques par une réduction des déplacements (visioconférences, télé-relève). Les TIC pourraient contribuer à réaliser un tiers des réductions d'émissions de GES (gaz à effet de serre) fixées par le gouvernement à l'horizon 2020. Dans le même temps, le secteur des TIC doit apprendre à gérer les consommations qu'il induit, puisqu'il représente près de 15 % de la consommation électrique (source : OCDE) via les nombreux équipements, réseaux et *datacenters*.

### Des consommateurs toujours plus exigeants dans un contexte d'accélération technologique

Le secteur des TIC est engagé dans une course à la performance (débit, qualité de service, qualité d'image, capacité des processeurs, mémoires, CPU, etc.). Ces performances accrues

sont nécessaires pour permettre une véritable migration vers le tout numérique et le tout IP de tous les contenus et services. L'innovation s'inscrit en effet dans un contexte de convergence numérique et d'explosion des usages des contenus et des services numériques via des accès Internet divers et des terminaux multiples.

Si certaines des innovations s'inscrivent dans une logique d'offre, de nombreuses innovations cherchent à mieux adresser l'évolution de la demande. Les consommateurs cherchent en effet des solutions de plus en plus adaptées à leurs besoins. Les industriels doivent donc prendre en compte les grandes tendances sociétales.

L'individualisation est en effet de plus en plus prononcée et implique une personnalisation forte des produits et services. Cette individualisation se retrouve dans les produits eux-mêmes, mais aussi dans la nature de la consommation dans le temps (exemple : dé-linéarisation des contenus) et dans l'espace. Le nomadisme se développe grâce aux capacités de transport sans remettre en cause la nécessité d'accès à l'information, d'où des besoins en connectivité plus forte. La crise a par ailleurs accéléré la prise en compte des considérations économiques dans le choix des produits.

La fracture numérique est enfin toujours importante entre les technophiles à la recherche de la dernière innovation, les plus aisés se tournant vers des offres haut de gamme ou encore les plus âgés recherchant avant tout des solutions simples d'usage. Les industriels doivent donc adopter de plus en plus des approches segmentées capables de cibler des niches de marché valorisant avec des critères différents les produits et services TIC autour d'offres modulables.

## **Des bénéfices économiques et sociétaux au-delà des TIC**

Les TIC jouent un rôle majeur dans le développement de la société en assurant une plus grande disponibilité de l'information et en favorisant les échanges. Leur adoption n'est toutefois pas encore totalement généralisée, notamment auprès de certaines parties du grand public ou des PME, faute de ressources financières mais aussi le plus souvent de capacités techniques et de connaissance des outils disponibles. Une diffusion plus large des TIC implique des externalités positives (effet réseau), mais aussi une baisse des coûts unitaires. Les acteurs doivent donc chercher à favoriser la promotion et l'adoption de leurs technologies par le plus grand nombre.

L'impact des TIC va bien au-delà du secteur lui-même avec une contribution forte à la productivité de tous les autres secteurs verticaux, en offrant des outils d'échange, de simulation et de stockage de l'information. Les bénéfices des TIC se retrouvent donc dans tous les pans de l'économie, du transport (gestion des trajets et itinéraires) à l'aéronautique (conception en 3D des avions) en passant par le commerce (gestion des stocks en temps réel) l'énergie (réseau électrique intelligent) ou la santé (suivi à distance des personnes à risque, télémédecine,

etc.). Les bénéfices sont aussi importants dans les secteurs non marchands, autour des services publics accessibles sur Internet (emploi, impôts, culture, etc.) ou des politiques publiques par exemple l'environnement (prévention des catastrophes) ou la prise en compte du vieillissement de la population (maintien à domicile).

Enfin, pour les pays industrialisés, les modèles traditionnels (agriculture, industrie lourde) laissent progressivement place à une tertiarisation de l'économie. Les TIC permettent aussi de contrebalancer le vieillissement de ces économies. Les pouvoirs publics poussent en faveur de nouvelles approches autour de l'économie de la connaissance, pour laquelle les TIC jouent un rôle d'accélérateur.

Cette dépendance croissante de pans entiers de l'économie vis-à-vis des TIC, impose une fiabilité et une disponibilité accrue tant pour les infrastructures (réseaux et logicielles) que pour les applications. La sécurisation et la souveraineté de la France sur les TIC sont donc des enjeux importants.

## **Les grandes tendances d'évolution du secteur**

À l'horizon 2015-2020, le paysage du secteur TIC devrait s'inscrire dans un contexte de nouvelles infrastructures plus performantes avec notamment :

- des composants électroniques de petite taille supportant des capacités de calcul plus importantes ;
- une connectivité Internet très haut débit sans couture et nomade dans les grandes villes et au-delà, profitant des technologies électroniques de base (nano, opto, etc.) ;
- des réseaux tout IP permettant de réduire les coûts et offrant des performances accrues ;
- une plus grande efficacité énergétique des composants, systèmes et réseaux, permettant un développement optimisant les consommations de ressources ;
- une informatique de plus en plus ouverte et de plus en plus en mode « nuage ». C'est la principale « révolution » de l'informatique depuis l'avènement d'Internet ;
- une proximité très forte avec les métiers à mesure que les TIC deviennent de plus en plus critiques dans leur fonctionnement.

L'informatique devient une industrie de plus en plus « lourde », basée de plus en plus sur le facteur capital. Selon la théorie de l'avantage comparatif de David Ricardo, ce devrait être un avantage pour la France, car c'est un pays où le facteur travail est cher et de plus en plus rare, mais où le facteur capital est relativement abondant. La France doit donc miser sur ses centres informatiques industrialisés (type informatique en nuages), pour éviter que ces travaux ne se délocalisent.

## **Des composants plus puissants**

Les innovations dans le secteur de la micro-nanoélectronique suivent deux tendances complémentaires :

• « *More-Moore* » : accroissement de la densité d'intégration des puces qui comportent plusieurs centaines de millions, voire quelques milliards, de transistors ;

• « *More-than-Moore* » : intégration de fonctions nouvelles, telles que des capteurs (images, puces ADN...), des actuateurs (MEMS/NEMS), des circuits RF, des mémoires non volatiles, des empilements 3D de composants... Les composants optoélectroniques entrent dans cette catégorie.

La course à l'intégration n'est accessible qu'à un nombre toujours plus restreint d'acteurs industriels en général largement soutenus par les États, contrairement à celle de la diversification fonctionnelle qui est davantage accessible.

## Internet toujours plus présent

En s'appuyant sur Internet, le secteur TIC proposera ainsi des produits et services convergents dotés de multiples fonctionnalités et capables de combiner différentes applications, services et contenus (intégration sans couture, etc.). La disponibilité accrue de contenus sous forme numérique, enrichie et interactive, permettra de stocker le patrimoine culturel mais aussi le « patrimoine numérique » personnel de chaque individu, autour notamment de solutions de stockage et de distribution avancées de contenus médias et personnels en ligne. Le contenu est alors accessible à travers différents terminaux et différents réseaux ou architectures (internet mobile, *cloud*), y compris à travers des distributions hybrides combinant Internet et réseaux terrestres pour mélanger les flux de contenus et les méta-données. Les solutions les plus avancées permettront ainsi un accès permanent à toute application en fonction du contexte d'usage (réseau disponible, débit disponible, terminal disponible, etc.).

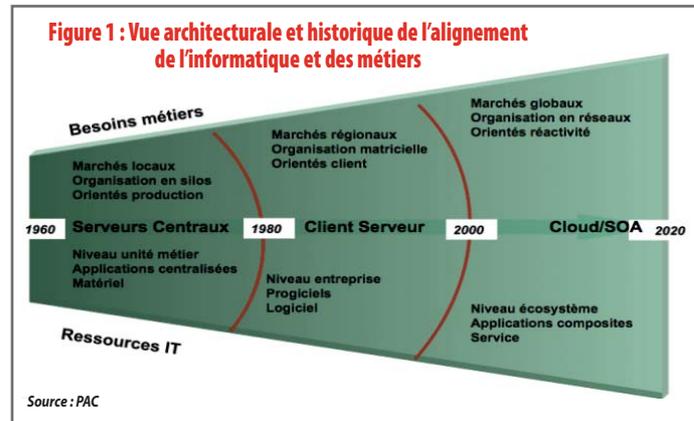
L'utilisateur disposera de différentes solutions intuitives pour mieux interagir avec les différents services numériques autour :

- d'environnements 3D interactifs (monde virtuel, conférence 3D, *serious gaming*, réalité augmentée, etc.), permettant des simulations, des immersions et des interactions virtuelles, assurant une meilleure collaboration tout en limitant les déplacements ;
- d'interfaces évoluées des principaux terminaux EGP pilotés au doigt, au mouvement de la main et/ou à la voix ;
- de moteurs de recherche intelligents, permettant de trouver plus efficacement une information, en tenant compte de critères personnels et du contexte, indépendamment de la langue et du support de l'information ou du contenu.

Enfin, le développement des TIC bénéficiera aussi aux autres secteurs avec une connectivité au-delà des ordinateurs, des téléphones mobiles et de l'électronique grand public. En s'appuyant sur la connectivité Internet et l'intégration de composants électroniques, de nombreuses machines vont devenir communicantes, permettant une automatisation plus forte et un suivi (voire un contrôle) à distance, y compris pour des machines en mouvement. Le suivi concernera des objets en mouvement dans le cadre d'applications logistiques.

## La « révolution » de l'informatique en nuages

L'informatique en nuage est la prochaine vague architecturale informatique.



De plus en plus d'entreprises se tournent vers l'informatique en nuage pour des raisons de coûts (promesse de « variabilisation » des coûts), de capacité et de facilité d'utilisation. La combinaison de l'informatique en nuage et du logiciel libre pourrait être une innovation destructrice telle que la conçoit Joseph Schumpeter, c'est à dire une innovation capable de changer les positions sur le marché.

Le *Cloud Computing* représentera en 2020 entre 20 % et 25 % du marché informatique.

L'informatique en nuage est vue comme prioritaire par les acteurs du secteur informatique, comme en témoignent les opérations spectaculaires de rachat de fournisseurs de technologie ou la mise en place d'alliances stratégiques.

Ceci implique la construction de centres de données fortement automatisés. La qualité et la capacité de l'infrastructure réseau sont critiques afin de conserver et attirer les investissements liés au *Cloud Computing* ; d'où une convergence croissante entre l'informatique et les télécoms.

À l'instar des réseaux haut débit, les infrastructures d'informatique en nuage doivent être perçues par les pouvoirs publics comme un investissement important pour conserver et accroître la compétitivité du pays. Ainsi, les aides publiques, la fiscalité et une réglementation adaptées sont très importantes pour que la France accueille ces investissements ; des investissements au moins équivalents à ceux qui sont courants dans des industries plus en vue comme l'automobile. À titre d'exemple, IBM va investir 300 M€ en Europe dans ce type d'infrastructure et le gouvernement français prévoit d'en investir 780 M€ au titre des investissements d'avenir.

Le *Cloud Computing* offre aux entreprises innovantes la capacité d'être plus réactives, d'expérimenter de nouveaux services et de les déployer massivement sans investir dans des salles informatiques. Il abaisse les barrières à l'entrée sur l'édition et la commercialisation de logiciel en mode *Software as a Service* (SaaS). Il permet à des petites entreprises, par exemple dans le secteur du multimédia, de recourir à des moyens de calcul intensif.

L'avènement de l'informatique en nuage nécessite aussi une gestion différente des données, la matière première de l'informatique et une approche globale, holistique, de la sécurité. C'est aussi une question de souveraineté nationale, car si des données stratégiques, que se soit pour une société ou pour le gouvernement, sont hors du territoire national, il y a des risques plus importants d'espionnage et de cyber criminalité. Par son optimisation, l'informatique en nuage permet de baisser les coûts d'infrastructure pour concentrer les budgets informatiques sur les projets qui impactent directement l'activité de l'entreprise et lui font gagner en compétitivité. Ainsi ces technologies sont vues comme prioritaires par la commission européenne d'après l'étude *The future of the Software and Software based Services in Europe* réalisée en 2010.



## À plus long terme

Au-delà de l'horizon 2015-2020, le développement du secteur TIC devrait s'appuyer sur des outils encore plus performants et une diffusion plus large de l'internet à encore plus d'objets dans le cadre de l'internet des objets, permettant à tout objet d'être connecté et de fournir et d'échanger de manière transparente des informations via Internet, aussi bien dans des environnements professionnels que grand public (maison intelligente-domotique, courses dans le commerce de détail, etc.).

D'autres innovations permettront d'aller plus loin dans les usages multimédias avec notamment l'affichage 3D relief sans lunettes, permettant une immersion accrue à domicile ou dans des lieux publics.

L'autre évolution majeure qui se prépare est la robotique. Ainsi après s'être couplée avec les télécoms dans le « nuage », l'informatique va fusionner avec l'électronique et la mécanique. La robotique repose en particulier sur l'intelligence artificielle et dispose de très nombreuses applications : militaire, sécurité, industrie, environnement hostiles, aide à la personne...

L'étape suivante, qui est déjà en préparation dans certains laboratoires, sera l'intégration de l'informatique, de la robotique et des organismes vivants. Ainsi le laboratoire d'optogénétique de Stanford a réussi à prendre le contrôle du cerveau d'une souris - dont une partie du cerveau avait été modifiée génétiquement par un virus - au moyen d'implants optiques. Cela devrait permettre le développement de prothèses robotiques

très performantes pour les handicapés. C'est le début de l'ère de la cybernétique, les systèmes de systèmes extrêmement complexes, à la fois vivants, mécaniques, électroniques et informatiques. À plus court terme, il est indispensable pour améliorer la compétitivité d'augmenter le taux d'usage des robots dans les entreprises.

## Les tendances technologiques et les technologies clés

Les principales technologies « capacitantes » pour le secteur TIC à prendre en compte dans la mise au point des produits et services évoqués auparavant sont notamment :

- les nanotechnologies permettant notamment la miniaturisation des composants tout en proposant des performances accrues. Par exemple, la filière des matériaux issus du graphène, qui pourraient avoir un impact aussi important dans les TIC que le silicium ;
- l'infrastructure télécom et les technologies de base associées dans le domaine de l'optique et de la radio longue portée pour la connectivité des personnes et des objets et des machines, et la distribution de contenus numériques éventuellement lourds (vidéo, 3D, etc.) ; les technologies réseau de routage (réseau cœur et réseau d'agrégation) sont aussi importantes dans un contexte de potentielle saturation des réseaux ;
- les architectures de communication sans fil très faible consommation, avec notamment les composants RFID (*Radio Frequency Identification*) et les technologies radio de courte portée permettant de rendre communicants les objets, notamment ceux dépourvus d'électronique embarquée ;
- les outils de numérisation et de conversion, permettant de transformer les contenus existants dans différents supports numériques ;
- les moteurs 3D permettant de créer et d'exécuter des contenus 3D et les solutions de réalité augmentée dans le cadre de simulations industrielles ou de développement multimédia ;
- les interfaces homme-machine tactiles et interactives (pointage, etc.) permettant de simplifier les usages de technologies complexes ;
- les nanotechnologies permettant notamment la miniaturisation des composants tout en proposant des performances accrues ;
- l'architecture orientée services, ou SOA en anglais, qui décompose les logiciels en briques modulaires et standardisées à la manière d'un Lego ;
- la virtualisation, qui est l'OS des architectures en nuages ;
- les outils sémantiques, capables de permettre une meilleure interaction entre l'homme et la machine ;
- les moteurs de recherche, qui sont assez complémentaires des outils sémantiques et qui proposent une nouvelle manière d'exploiter le volume toujours plus important de données ;



- le logiciel libre, qui mutualise la R&D et la maintenance pour certains logiciels, en particulier les logiciels d'infrastructure, là où la présence française est très faible ;
- les mathématiques appliquées à l'informatique, car pour repousser sans cesse les limites de l'informatique, il faut des algorithmes de plus en plus sophistiqués ;
- le calcul intensif ;
- l'intelligence artificielle, de plus en plus présente dans nos systèmes de plus en plus automatisés et humains.

Ces différentes technologies prennent place dans les serveurs et les terminaux EGP, mais aussi éventuellement dans n'importe quelle machine ou n'importe quel objet grâce à l'ajout de composants de connectivité dans tous les terminaux EGP, mais aussi dans des machines (le plus souvent utilisables sans connectivité, comme par exemple une voiture ou un compteur électrique) et des capteurs RFID, sur des étiquettes ou des tags, collés ou intégrés dans le produit. D'autres capteurs peuvent être ajoutés sur les terminaux, notamment pour favoriser la création de contenus ou informations numériques (caméra, scanner, etc.),

ainsi que des composants électroniques spécifiques pour l'affichage des informations, par exemple pour la 3D.

Cette intégration dans les produits nécessite à la fois une miniaturisation des capteurs et composants qui ne doivent pas changer fondamentalement la nature du produit, ainsi qu'une réduction des coûts unitaires de ces composants (la valeur de l'électronique devant rester marginale par rapport à celle du produit, dont le coût unitaire est parfois très faible). L'intégration dans les produits et services implique aussi des performances accrues, notamment des terminaux, pour gérer en temps réel les contenus volumineux.

Il est important que ces technologies soient les plus standardisées possibles, à l'instar de ce qui se fait dans les autres industries. Cette intégration de systèmes de systèmes de plus en plus complexes nécessite d'importantes capacités à modéliser cette complexité et à la gérer.

Si des modifications des produits et objets sont nécessaires, il ne s'agit pour autant que de la partie émergée de l'iceberg. Tous ces terminaux, machines et objets devront se connecter à Internet pour aller chercher ou échanger des informations.

Il faut donc pouvoir s'appuyer sur des infrastructures télécom/IT dans le réseau Internet et/ou dans les réseaux des opérateurs de produits de distribution avancée (CDN, serveurs *cloud*).

L'intégration des nouvelles technologies dans les produits et services n'est donc possible que si cette infrastructure mutualisée est utilisable à des coûts raisonnables, ce qui suppose notamment des coûts d'investissements limités. Elle requiert aussi d'être déployable à grande échelle, ce qui suppose une bonne gestion des grands volumes de données récoltées dans les systèmes d'information et une prise en compte des données dans les processus de décision.

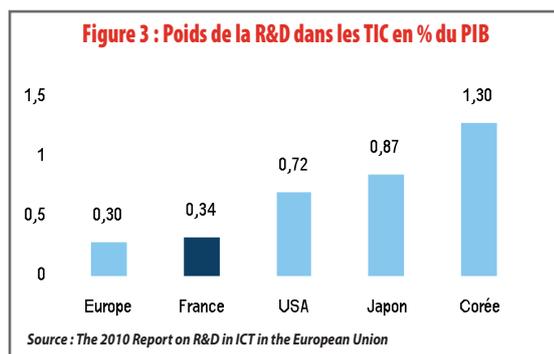
Enfin, l'intégration dans les processus suppose une évolution des compétences des concepteurs et développeurs des futurs produits et services associés. Il s'agit en effet d'avoir une maîtrise simultanée de nombreuses technologies (matériel, logiciel, contenu et réseau) permettant le développement d'applications, services et contenus multimédias enrichis, en prenant en compte une multitude d'interfaces. Cette maîtrise des compétences peut se faire aussi bien par des doubles ou triples compétences que par des bonnes organisations de travail en équipe. La formation est donc critique pour le développement des TIC.

L'utilisateur doit par ailleurs être capable d'utiliser les nouveaux produits et services, sans forcément maîtriser l'ensemble des technologies. Les industriels doivent donc proposer des solutions intuitives centrées sur les usages plus que sur les technologies.

## Analyse de la position de la France

### Le poids de la R&D

Les efforts de R&D dans les TIC en France se situent légèrement au-dessus de la moyenne européenne, mais restent en retrait par rapport à d'autres pays comme les États-Unis, le Japon et surtout la Corée du Sud. La France n'est pas représentée dans tous les segments (faible par exemple en électronique grand public ou en logiciels *middleware*), mais dispose en revanche d'acteurs industriels ou de laboratoires de recherche reconnus comme des acteurs de référence mondiale dans certains sous-segments majeurs pour le développement de l'industrie des TIC.

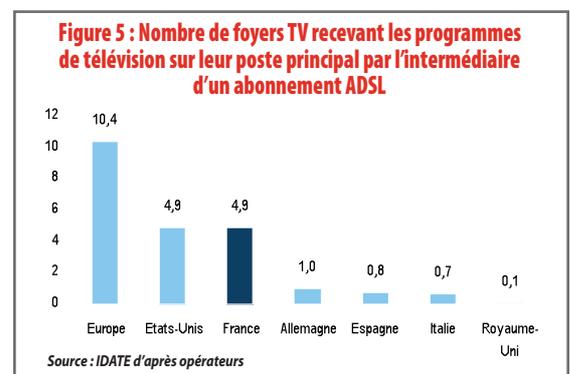
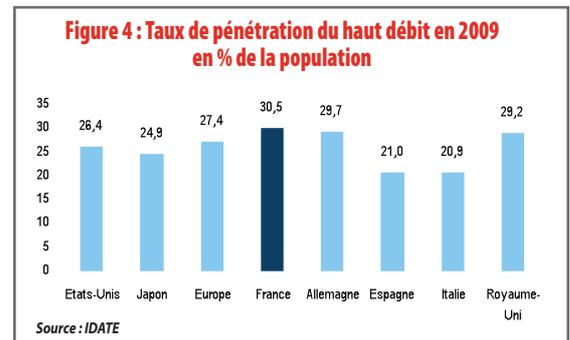


## Principaux atouts de la France dans les TIC

La France occupe la première position dans l'industrie européenne des composants électroniques (électronique industrielle) et accueille sur son territoire des acteurs majeurs de recherche (CEA Leti, CNRS LAAS...) et industriels (STMicroelectronics, Soitec, NXP, Atmel, Freescale, Altis, Ipdia, etc.). La position européenne dans la micro-nanoélectronique est toutefois en retrait dans le monde.

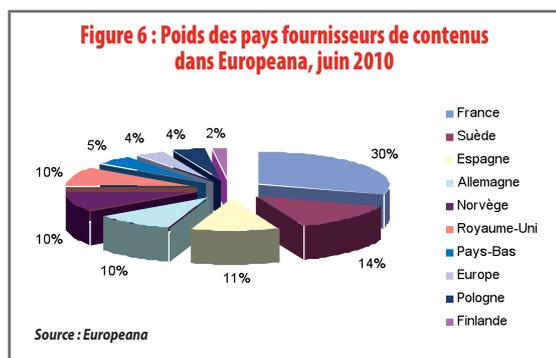
La France est par ailleurs très bien représentée dans certains domaines des composants électroniques, notamment au niveau des cartes à puce, cartes sans contacts et du RFID (Gemalto, SK, Tagsys, Pôle SCS, etc.), tout en étant impliquée sur l'ensemble de la micro-électronique (ST Microelectronics, Soitec, etc.).

La France est un des pays de référence dans le domaine des télécommunications autour d'opérateurs et d'équipementiers majeurs avec un rayonnement mondial (France Télécom, Alcatel-Lucent, Sagem, Thales, etc.) et profite d'un marché assez développé de services télécoms, notamment en haut débit, sur lequel des innovantes majeures comme l'IPTV ont été développées.



La France est aussi dans les pays majeurs en ce qui concerne le développement des objets connectés, autour du M2M (*Machine-to-Machine*) et de l'Internet des objets, autour des opérateurs, de fournisseurs de modules M2M (Gemalto, etc.), et de jeunes pousses (Violet, WiThings, etc.).

Dans le domaine du contenu numérique, la France dispose d'un rayonnement mondial au niveau de la 3D, de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée via des acteurs majeurs (Dassault Systems, Thales, Total Immersion, etc.) et une formation reconnue internationalement mais aussi dans la conception et la fabrication de systèmes de vidéo et d'image numérique pour les professionnels (Technicolor, etc.). La France est aussi un acteur majeur dans le domaine de la numérisation de contenu, autour notamment de la vidéo (INA) et des livres (BNF). Europeana, projet de bibliothèque numérique leader en Europe, compte aujourd'hui plus de sept millions d'œuvres numérisées dont 30 % ont été fournis par la France.



La France occupe une position moyenne en général dans les matériels, logiciels, et services informatiques en deçà de l'Allemagne et de la Grande Bretagne, légèrement au dessus de son poids au niveau du PIB (6 % de la dépense informatique mondiale selon PAC).

Dans ce domaine, les principaux atouts de la France sont son expertise quasiment unique (à part les États-Unis) dans les systèmes embarqués les plus complexes qui sont utilisés par l'aérospatial et le militaire : ce marché représente plus de 15 % de la dépense informatique globale, un des taux les plus élevés au monde (données PAC). La France possède des champions de niveau mondial dans ce domaine, comme Altran.

C'est aussi le pays le plus intensif en logiciel libre au monde (nombre de projets par rapport à la population) selon une étude de GeorgiaTech publiée en 2009. Cela lui permet de combler certaines de ses faiblesses dans les logiciels d'infrastructure.

La France est aussi un des pays où la pénétration des architectures orientées services est la plus forte (d'après le Gartner), ce qui lui permet d'avoir des systèmes plus efficaces et plus alignés avec les besoins métiers mais aussi d'aller plus facilement vers l'informatique en nuages.

C'est aussi une des plus importantes industries du service informatique au niveau mondial, derrière les États-Unis et le Japon, et l'une de celles qui s'est le plus internationalisé à l'instar d'un Capgemini ou d'un Atos Origin. Selon PAC, en chiffres d'affaires services informatiques, ces sociétés sont respectivement septième et treizième acteurs mondiaux.

Enfin, et c'est peut-être là l'atout majeur de la France, il y a aussi dans l'hexagone d'excellentes compétences informatiques et une des meilleures écoles de mathématiques au monde. En effet la France est le second pays qui a le plus gagné de médailles Fields, avec onze médailles (dont celle de 2010) contre treize pour les États-Unis, le premier de ce classement. L'informatique étant une évolution connexe des mathématiques, celles-ci sont donc vitales pour des technologies telles que l'algorithmique, les systèmes complexes, les systèmes de systèmes, l'intelligence artificielle...

## Dispositifs d'accompagnement

De nombreux dispositifs d'accompagnement permettent à l'industrie française d'accélérer son développement dans l'industrie des TIC :

- pôles de compétitivité (Images et Réseaux, Cap Digital, Systematic, SCS, AESE, Finances@innovation, Medicen, Advancity, etc.) ;
- ANR (Agence nationale de la recherche) ;
- soutien aux projet de R&D stratégique du ministère de l'Industrie ;
- Rapid (Régime d'appui aux PME pour l'innovation duale) du ministère de la Défense ;
- All (Agence de l'innovation industrielle) ;
- appels thématiques du gouvernement (Serious Game, NFC/RFID, etc.) ;
- volet numérique du grand emprunt (infrastructure télécom, numérisation, etc.) ;
- Clusters Euréka (Celtic, Itea, Medea/Catrene, Euripides, etc.) ;
- FTI Carene et Artemis ;
- institut de recherche technologique du grand emprunt ;
- réseaux de recherche (RNNTL, Riam, RNRT) ;
- instituts Carnot ;
- société civile du calcul intensif ;
- FSI (Caisse des dépôts) ;
- Oséo ;
- crédit d'impôt recherche (CIR) ;
- statut des jeunes entreprises innovantes (JEI).

## Facteurs de diffusion

Plusieurs facteurs majeurs doivent contribuer à l'essor de ces technologies. La mise en place de standards ou au moins de solutions interopérables permet d'accélérer la diffusion des technologies, en s'appuyant ainsi sur une production de masse et des prix unitaires plus faibles (aussi bien en matériel qu'en logiciel). Un résultat analogue peut être obtenu via une bonne organisation de l'écosystème, via notamment des plateformes autour d'un acteur majeur.



L'infrastructure de communication de haut niveau en France est aussi un atout pour la diffusion des TIC.

La fiscalité française autour de l'innovation est l'une des plus intéressantes en Europe et aide de nombreuses jeunes pousses à se développer.

L'un des facteurs les plus importants est la présence en France d'un nombre important de grandes entreprises mondiales, voire de champions, dans des domaines très consommateurs de TIC comme le militaire, l'aérospatial, les télécoms, la finance...

Un autre facteur majeur est la capacité des développeurs, voire éventuellement des utilisateurs, à maîtriser les différentes technologies clés au cœur de la convergence numérique. La mise en place de formations pluridisciplinaires va clairement dans ce sens.

Le dernier facteur, et sûrement le plus important est l'arrivée dans la vie active d'une classe d'âge -la génération Y- qui a grandi, et ce dès le plus jeune âge avec les TIC. Ces jeunes actifs ont une affinité particulière pour l'utilisation des TIC et surtout les avantages qu'ils procurent. Ils devraient fortement participer à la diffusion des TIC dans notre économie.

## Freins économiques à la diffusion

Les principaux freins à la diffusion des technologies évoquées sont d'ordre technique et économique. D'un point de vue technique, les performances réellement constatées ne sont pas toujours au rendez-vous en dehors des laboratoires de test, notamment pour les solutions sans fil. D'une manière générale, les déploiements à grande échelle de certaines technologies restent complexes et leur usage parfois peu aisé pour le grand public. La cohabitation d'un nombre croissant d'applications, de services et de terminaux par utilisateurs rend complexe l'introduction de toute nouveauté.

Le problème est toutefois souvent avant tout économique, la plupart des limitations techniques (des exceptions existent toutefois autour par exemple du spectre ou des grands systèmes d'information) pouvant être résolues par des investissements supplémentaires. Mais la difficulté provient justement de ce que de nombreux services et produits TIC s'appuient sur des modèles économiques instables et/ou nécessitent des investissements initiaux colossaux (fibre, LTE, RFID, etc.).

L'informatique en nuages va nécessiter de lourds investissements et peu d'entreprises en seront capables. De plus le pas-

sage en mode service à la demande chez les éditeurs risque de créer des besoins en fonds de roulement qui pourraient asphyxier les plus fragiles.

L'empreinte énergétique des TIC pose une problématique croissante pour l'ensemble de l'écosystème. Du point de vue de l'empreinte carbone, les TIC sont actuellement au niveau du transport aérien avec une croissance cependant beaucoup plus élevée. *A contrario* elles permettent aussi des économies d'énergie sous certaines conditions, évoquées par exemple dans le rapport « DETIC » du CGIET.

### Freins sociaux à la diffusion

Les développements de nouveaux services TIC doivent toutefois se faire en prenant en compte la dimension sociale. Le volume de données collectées sur un individu donné est en effet en pleine explosion, avec notamment les réseaux sociaux, les réseaux de capteurs sans fil, ou les services de géolocalisation, permettant de proposer à l'utilisateur final de nouvelles fonctionnalités.

La robotique et l'intelligence artificielle posent aussi un problème éthique quant au niveau d'autonomie qu'on pourrait conférer à ces systèmes.

Si les bénéfices pour les usagers sont donc importants (confort d'usage, nouveaux services disponibles, coût plus faible, etc.), les risques sont toutefois jugés élevés par les utilisateurs concernant le risque de vol ou d'usurpation d'identité, limitant en partie les usages. L'exploitation des données personnelles à des fins frauduleuses ou commerciales (ciblage publicitaire, etc.) soulève aussi de nombreuses questions.

## Recommandations

L'importance des TIC pour tous les secteurs n'est plus à démontrer, tant au niveau des emplois, que de la valeur ajoutée ou de l'impact transversal sur l'ensemble de l'économie. La France est plutôt bien positionnée

Pour mieux développer ce secteur, il convient de continuer et d'amplifier les politiques d'aides publiques ciblées sur les technologies clés des TIC, notamment celles présentant un fort caractère générique. Cela vaut notamment pour les pôles de compétitivité et les clusters Euréka, souvent indispensables pour dégager les masses critiques au niveau européen.

Le développement du secteur des TIC repose par ailleurs fortement sur le développement de standards de droit ou de fait, voire d'interopérabilité. L'existence de standards permet un développement plus rapide et moins coûteux de nouvelles solutions et technologies construites à partir des technologies standardisées. Toutes les initiatives permettant de développer des standards sont donc à privilégier. Ces initiatives doivent être déployées au niveau international (européen au minimum) pour profiter d'un effet de masse.

L'implication des pouvoirs publics autour de la régulation des données est centrale. Le rôle joué par la capacité à combiner des données, notamment des données personnelles, dans le développement de nouvelles applications, devient primordial et doit être encadré pour assurer un bon niveau de sécurité et de confiance numérique, levant ainsi les freins au développement des usages par les entreprises et les particuliers.

Le développement des technologies clés repose pour beaucoup d'entre elles sur des infrastructures très coûteuses (haut débit, numérisation de contenus, calcul intensif, informatique en nuages, usines de composants, etc.). Le développement d'approches mutualisées pour partager les coûts et les risques (co-innovation) et l'apport éventuel de financements publics doivent permettre de lever certaines des contraintes financières associées.

Enfin, le développement des TIC nécessite une maîtrise de plusieurs compétences techniques dans différents domaines. La coordination entre les différents segments des TIC est parfois trop faible alors que la convergence numérique est au cœur des nouveaux produits et services. Les fournisseurs de ces nouvelles technologies doivent se préparer à appréhender en direct ou via leurs partenaires (dans une logique d'innovation ouverte) de nouvelles expertises complémentaires nécessaires. L'interdisciplinarité doit être encouragée et même aller plus loin avec l'intégration de compétences non TIC (santé, énergie, etc.), sur lesquelles l'Europe dispose de positions de force. De même la politique des pôles de compétitivité engagée et des centres de compétences comme Saclay Grenoble, Sophia Antipolis ou la Bretagne est à poursuivre.

Au niveau mondial, les grandes entreprises françaises sont aussi bien équipées et compétitives que leurs consœurs étrangères, mais les PME françaises restent relativement peu informatisées. Aider les PME à s'informatiser d'avantage pour gagner en productivité est donc très important.

Les passerelles entre le monde des entreprises et la recherche publique fonctionnent plutôt bien, mais gagneraient à être d'un accès plus facile pour les PME. Les pôles de compétitivité du secteur sont un bon exemple.

Un *Small Business Act* à la française, sujet récurrent depuis des décennies, permettrait de réserver une partie plus importante des commandes publiques aux jeunes pousses. Le ministère de la Défense a mis en place un dispositif de ce type.

La formation est une fois encore le point critique à souligner aussi bien pour les technologies de l'information (afin de disposer de suffisamment de compétences), que pour des disciplines connexes mais critiques afin de faire émerger des entreprises fiables : marketing, juridique, ventes... L'aspect entrepreneurial mis en avant dans toutes ces formations est identifié comme un axe d'amélioration pour la France.



# 13. Robotique

L'asservissement des degrés de liberté d'une machine-outil et leur pilotage par une machine-numérique programmable a conduit à la large diffusion des machines-outils à commande numérique (MOCN).

Par rapport à une machine-outil, un robot industriel permet la préhension et le contrôle spatial et temporel d'un solide dans l'espace de travail du robot. Le robot sera dit complet au sens de la mécanique s'il dispose d'au moins six degrés de liberté.

Toutefois de nombreuses tâches peuvent être assurées avec deux, trois, quatre ou cinq degrés de liberté.

Le robot industriel est généralement un bras manipulateur fixe par rapport à la tâche répétitive qu'il doit effectuer. D'autres robots peuvent se déplacer pour assurer des tâches dans un environnement plus complexe. On parle alors de robotique mobile ou de robots de service.

## Description

Un robot est un système mécanique polyarticulé disposant de moyens de perception, de raisonnement et d'action capable de se substituer totalement ou partiellement à l'homme dans des tâches d'interaction avec le monde physique.

La robotique s'est déployée depuis les années soixante au travers de la robotique dite industrielle ou encore manufacturière.

## Typologie des robots et applications

Les principales applications des robots industriels concernent le chargement et déchargement des machines, le soudage par points ou le soudage continu, la peinture, l'assemblage.

On distingue classiquement quatre classes de robots avec leurs domaines d'applications spécifiques :

**Les robots tout ou rien** (*pick and place*), pour lesquels seuls les points de préhension et de lâcher des objets sont définis. Ils servent principalement au chargement et déchargement des machines. Ils sont le plus souvent pilotés par des automates programmables à l'aide de méthodes telles que le grafset.

**Les robots programmables** ont leurs degrés de liberté asservis en position et éventuellement en vitesse. Ils sont programmés par apprentissage au moyen de consoles ou de pantins. Les trajectoires de consigne sont rejouées (on parle de robot *play back*). Pour les applications complexes, ils peuvent être programmés par CAO ou au moyen de langages textuels. Ces robots servent typiquement au soudage, à la peinture, à la découpe laser ou au jet d'eau, au montage, à l'assemblage. Pour ces tâches, le robot manipule le plus souvent un outil relativement à la pièce. Pour des applications telle le contrôle qualité, le robot déplace un capteur par exemple une caméra qui constitue un capteur intelligent.

**La télé robotique.** Il arrive que l'homme doive rester dans la boucle pour le contrôle total ou partiel du robot. On parle alors de configuration maître-esclave qui caractérise la télé robotique. C'est le cas où le robot intervient dans des environnements dangereux pour l'homme comme le nucléaire, le spatial, le milieu sous-marin, les situations d'incendie ...

Dans le domaine médical, on exploite principalement la précision en positionnement et la maîtrise des micro-déplacements que garantit le robot. Le robot n'intervient pas en autonome mais en configuration maître-esclave avec le chirurgien qui peut réaliser la tâche avec assistance en réalité augmentée avec des précisions de quelques millimètres alors que le robot travaille au centième ou au micron.

Dans la méga robotique qui caractérise les travaux publics, le domaine minier, les tunneliers, c'est le contraire, l'homme peut projeter ses actions en multipliant les forces et l'amplitude des déplacements

**Les robots de service** rassemblent les robots qui ne sont pas manufacturiers au sens usuel de la robotique industrielle.

Toutes les activités humaines sont concernées. C'est ainsi que la robotique agricole a vu en quelques années l'apparition des robots de traite des vaches, des robots de cueillette des fruits, des robots de tonte des moutons, des tracteurs autonomes guidés par GPS...

Les applications militaires sont nombreuses et en deçà de ce que la technologie permet aujourd'hui. Les drones d'observation aérienne, les robots de déminage ou porteur de charges lourdes sont autant d'exemples.

Les armées de terre, de l'air et la marine sont concernées. On parle de *UXV Unmanned X Vehicle* avec X pouvant être *Aerial, Ground, Surface et Underwater*.

Les systèmes de transports intelligents et en particulier l'automatisation de la conduite automobile s'appuient sur les technologies clés de la robotique et contribuent à faire avancer la robotique.

La robotique dite de service comprend aussi la robotique humanoïde très en vogue dans la recherche académique actuelle. Les applications sont surtout ludiques même si on avance le concept de robot compagnon pour l'assistance à domicile.

## Enjeux et impacts

La robotique est critique pour la compétitivité du secteur industriel. Les deux pays développés les plus exportateurs au monde, le Japon et l'Allemagne sont aussi les plus équipés en robots industriels. Cela renforce leur spécialisation dans les segments de haut de gamme et accroît leur compétitivité en remplaçant une force de travail comparativement chère par un investissement en capital (les robots). Ces pays ont ainsi une différenciation compétitive très forte sur les marchés internationaux.

Le nombre de robots en activité est en pleine explosion depuis une quinzaine d'années, et cela sous les effets combinés des progrès techniques (électronique, nanotechnologies, énergie, intelligence artificielle...) et de la baisse des coûts (divisés par quatre pour les robots industriels entre 1990 et 2009).

Cette croissance sera fortement stimulée par la croissance des robots à usage privé, des plus simples (aspirateurs, robots piscines, jouets...) aux plus complexes (robots humanoïdes).

Le marché global de la robotique, estimé à 11 milliards de dollars en 2005, pourrait passer à 30 milliards de

### Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

### Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

dollars en 2015. C'est un marché où le potentiel en services associés est très important.

Le robot autonome satisfait à trois fonctions essentielles : la perception, le raisonnement et l'action. Si plusieurs robots interagissent entre eux ou avec leur environnement, il convient d'ajouter la fonction communication et on parle alors de robotique collaborative.

Le verrou principal de la robotique est la perception de l'environnement. Le robot doit se localiser, percevoir et modéliser son environnement et élaborer les plans d'actions qui lui permettent de réaliser sa mission.

La perception utilise plusieurs capteurs : caméras, radars, lidars, centrale inertielle, GPS associés à des cartographies numériques. La fusion des informations implique des outils logiciels puissants d'acquisition et de datation précise de toutes les informations élémentaires pour assurer la cohérence spatiale et temporelle.

Le dernier enjeu est celui de l'intelligence artificielle. Une des pistes les plus intéressantes est la technologie multi-agent, qui s'apparente à l'intelligence collective d'insectes sociaux. On arrive ainsi à ce que l'on nomme la robotique cognitive.

Ce marché conserve de très fortes relations avec l'ingénierie de systèmes complexes et de systèmes de systèmes, la sémantique et l'intelligence artificielle.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : LAAS (Toulouse), LIRMM (Montpellier), Isir (Paris UPMC), LIPS6 (Systematic), Ircyn (Nantes), SRI (Orleans), LISV (Versailles), CEA List, HeudysiacCompiègne), Gipsa, LIG, TIMC(Grenoble), Inria, Ensta, Mines-Paristech...
- **Industriels** : Cybernetix, EKIUM, Thales, Sagem, EADS, Easyrobotics, Hexagone, BA Systemes, Robotics Concept, Aldebaran Robotics, ERI, Automation, Robosoft, Intempora, Gotsai
- **Syndicat professionnel** : Sympo : Opération « Robotcaliser » pour les PME, GDR Robotique pour la recherche

## Position de la France

Le marché de la robotique civile est largement dominé par le Japon, en particulier grâce à des conditions culturelles et démographiques particulières. Le gouvernement a fait de la robotique un axe majeur.

Les industriels japonais, et les industriels allemands, sont aussi les champions de la robotique industrielle. Ils se basent sur leur marché local qui est très dynamique. Ainsi, selon IFR, l'Allemagne représente 42 % du parc européen et la France 10 % en troisième position derrière l'Italie. De fait, ce parc est vieillissant avec des robots qui ont en moyenne cinq ans de plus que leurs équivalents allemands. Les champions de ce segment sont allemands ou japonais.

Le marché de la robotique militaire est, pour des raisons politiques, dominé par les États-Unis et Israël. Les robots ont vu leurs crédits militaires quintupler.

La France reste bien positionnée grâce à une excellente maîtrise de l'intelligence artificielle. Ainsi la plateforme multi-agent développée au LIRMM équipe plusieurs robots japonais.

## Analyse AFOM

### Atouts

Industrie high-tech, qui possède l'ensemble des disciplines nécessaires, capacité en ingénierie de systèmes complexes, intelligence artificielle.

### Faiblesse

Focus politique, barrières culturelles, mais surtout un manque d'intégrateurs de systèmes robotiques industriels.

### Opportunités

Les logiciels pour robots, les transports intelligents, les environnements à risques.

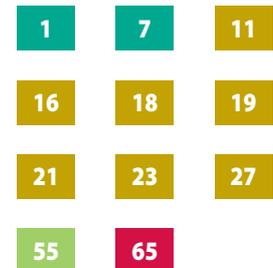
### Menaces

L'avance japonaise.

## Recommandations

À l'instar du gouvernement japonais dans le civil ou américain dans le militaire, la robotique doit être une priorité des aides publiques, car c'est la « nouvelle frontière » des TIC. Il convient de développer les formations correspondantes. Pour lever les verrous, il est crucial de rapprocher les domaines d'excellence française qui sont connexes à la robotique : systèmes complexes, intelligence artificielle, batteries, nanoélectronique...

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 14. Technologies réseaux sans fil

### Description

Un réseau mobile est constitué de stations de base qui assurent la couverture d'une zone géographique donnée et gèrent la communication avec les équipements terminaux.

La durée de vie d'une génération de système mobile est d'environ vingt ans. Les réseaux GSM, lancés en 1993, sont totalement matures et seront remplacés d'ici cinq à dix ans par des réseaux 3G ou 4G. Les réseaux 3G connaissent encore des améliorations et resteront en service encore dix à quinze ans. Les réseaux LTE (*Long term evolution*) seront lancés en 2011-2012 en France et verront apparaître leur évolution 4G à partir de 2015. Cette dernière permettra de porter les débits en mobilité à environ 100 Mbps crête par utilisateur en voie descendante. Ce débit atteindra 1 Gbps maximum en situation de nomadisme.

La technologie WiMAX Mobile qui fournit des caractéristiques proches de LTE ne connaît pas le même développement et souffre d'un écosystème très limité.

Les évolutions des réseaux mobiles sont, outre l'amélioration continue de l'efficacité spectrale et donc des débits, le passage d'une architecture en mode circuit à une architecture paquet IP qui autorise notamment une intégration plus poussée avec les réseaux fixes. Une évolution également notable est celle de la radio logicielle, dans laquelle les fonctions physiques liées au processus de transmission (modulation, filtrage, etc.) sont réalisées par des calculateurs numériques, permettant une grande évolutivité des matériels.

Le développement des *chipsets* pour terminaux mobiles et objets communicants se caractérise par une puissance accrue, une intégration très poussée et le support de plusieurs standards.

### Applications

Les technologies de réseaux sans fil s'appliquent dans les marchés et domaines applicatifs de la mobilité et autorisent des applications de voix, de messages courts et de transmission de données. L'ajout de fonctions de géolocalisation et de services de paiement et de loisirs (vidéo, télévision, jeux...) augmente l'attractivité des terminaux mobiles.

Elle permet également les communications M2M (*Machine-to-machine*) que ce soit la transmission de faibles quantités d'information (exemple relevé de compteurs), ou de plus gros débit pour la vidéo (télésurveillance par exemple).

Dans certains cas, les technologies mobiles peuvent servir de substitut lorsqu'aucun réseau fixe n'est disponible. Avec les évolutions de la 3G et l'arrivée du standard LTE,

les réseaux mobiles peuvent offrir des services d'accès à Internet dans des zones blanches. La couverture de ces zones sera néanmoins soumise à des contraintes réglementaires éventuelles et à des soutiens des collectivités locales comme auparavant pour le GSM.

Le déploiement des réseaux de prochaine génération LTE est conditionné à l'attribution de spectre dans les bandes des 2,6 GHz et 800 MHz. Cette technologie sera disponible dans un premier temps dans les grandes villes pour apporter de la capacité alors que les réseaux 3G commencent à connaître des phénomènes de saturation.

Le marché français des services mobiles a représenté un chiffre d'affaires de 20,4 Md€ en 2009 selon l'Arcep. Il correspond à 101 milliards de minutes de communications et 63 milliards de SMS et MMS.

### Enjeux et impacts

Les technologies de réseaux radio mobile permettent d'offrir des services sur une grande partie du territoire aux personnes en situation de mobilité. Elles permettent également de répondre à des besoins sociétaux grandissants comme :

- étendre la zone d'utilisation des terminaux à l'international grâce à la standardisation de la technologie mobile et au *roaming* (itinérance) international ;
- rendre possible un certain nombre de soins médicaux à domicile et ainsi limiter les déplacements de patients ;
- faciliter l'accès aux contenus éducatifs concernant la formation ;
- réduire les déplacements des professionnels grâce à l'utilisation facilitée de la visiophonie.

Il s'agit d'une technologie diffusante et d'avenir en constante amélioration sur le plan technologique et dont le coût d'utilisation baisse significativement grâce à sa diffusion mondiale.

Enfin, les contraintes de consommation électrique sont de plus en plus prises en compte avec une réduction de l'encombrement et de la consommation des stations de base.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

Faible diffusion

Diffusion croissante

Généralisation

#### Degré de diffusion en France

Faible diffusion

Diffusion croissante

Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D publique** : CEA Leti, Institut Telecom, LAAS, Inria, IMS, Labsticc, Irisa, IETR, Irit, LIG, LIP6
- **R&D privée** : Alcatel-Lucent, SagemCom (notamment femtocells), Gemalto, EADS, Thales, ST-Ericsson, Sequans sur le LTE, etc.
- **Opérateurs** : SFR, France Telecom/Orange, Bouygues Telecom Free Mobile (en 2011-2012)
- **Intégrateurs-supports** : de nombreuses PME (Astellia, etc.)
- Arcep, Afom (Association des opérateurs mobiles français), pôles de compétitivité (Images et Réseaux, Systematic, etc.)

## Position de la France

La France a joué un rôle moteur avec l'Allemagne dans la définition du GSM, qui est depuis devenue une norme mondiale, et est très impliquée dans le développement des nouvelles normes de téléphonie mobile.

Les infrastructures mobiles sont très développées en France assurant une bonne couverture et qualité de service.

Masse critique des acteurs : Alcatel-Lucent est un fournisseur d'infrastructures mobiles dans le Top 5 mondial ; Gemalto est le leader mondial de la carte à puce ; Orange est un opérateur présent dans de nombreux marchés à l'international (présence dans 38 pays). La Défense est impliquée dans la mise au point de la radio logicielle.

Aucune difficulté spécifique n'est à noter dans l'adoption de la technologie mobile, en dehors de retards dans le décollage des générations précédentes, principalement en raison du manque d'attractivité des premiers terminaux.

## Analyse AFOM

### Atouts

Un secteur concurrentiel et une innovation technologique très dynamique.

### Faiblesses

Des engagements de couverture 3G non tenus dans les délais par les opérateurs, couverture à l'intérieur des bâtiments perfectible, saturation des réseaux mobiles.

### Opportunités

Desserte des zones non couvertes par les réseaux fixes avec le dividende numérique.

### Menaces

Besoins en débit sans cesse croissants des applications mobiles ; saturation du spectre électromagnétique, acceptabilité sociale vis-à-vis des rayonnements électromagnétiques.

## Recommandations

Le spectre radioélectrique qui constitue une ressource rare doit être optimisé afin de permettre de supporter l'explosion du trafic de données mobiles. Cela passe par une coordination internationale et par l'anticipation des besoins futurs.

Des initiatives autour des services mobiles doivent être supportées car la position des acteurs français peut être fragilisée par le manque de compétitivité dans les autres secteurs (terminaux, services).

Il est nécessaire de soutenir les initiatives des collectivités locales qui permettent d'accélérer la disponibilité du très haut débit mobile pour l'ensemble de la population en particulier grâce à l'apport du dividende numérique.

Enfin, il serait nécessaire de développer des activités de R&D aux frontières entre le matériel et le logiciel et dans les domaines qui concernent l'interopérabilité.

### Liens avec d'autres technologies clés

15

16

22

23

29

51

66

74

80

82

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 15. Réseaux haut débit optiques

### Description

Les réseaux basés sur la fibre optique se sont beaucoup développés depuis le milieu des années 2000, en particulier dans les pays du nord de l'Europe et en Asie. Ils sont considérés à juste titre comme plus pérennes et performants que les réseaux basés sur le cuivre.

Les évolutions actuelles portent davantage sur les technologies mises en œuvre que sur les architectures à proprement parler. En effet, plusieurs technologies coexistent :

- Ethernet point à point: une fibre de bout en bout entre le central de raccordement et l'abonné ;
- Ethernet point à multipoint (communément appelé *Active Optical Network*) : technologie utilisant un commutateur pour démultiplexer la fibre arrivant du central ;
- PON (*Passive Optical Network*) : technologie la plus déployée dans le monde aujourd'hui, s'appuyant sur un coupleur optique, équipement dit passif.

Les standards actuels permettent d'atteindre des débits théoriques très élevés, dépassant le Gbps. En réalité, en France, les offres actuelles sont de l'ordre des 100 Mbps. À l'avenir, les évolutions technologiques permettront de fournir des débits au-delà des 10 Gbps.

Néanmoins, le principal frein au déploiement des réseaux FTTx reste le coût de déploiement, car ils nécessitent des travaux de génie civil très onéreux. Les technologies et architectures mises en œuvre sont donc choisies en fonction de l'intérêt technique mais aussi du coût qu'elles représentent au regard du territoire concerné (urbain vs rural notamment).

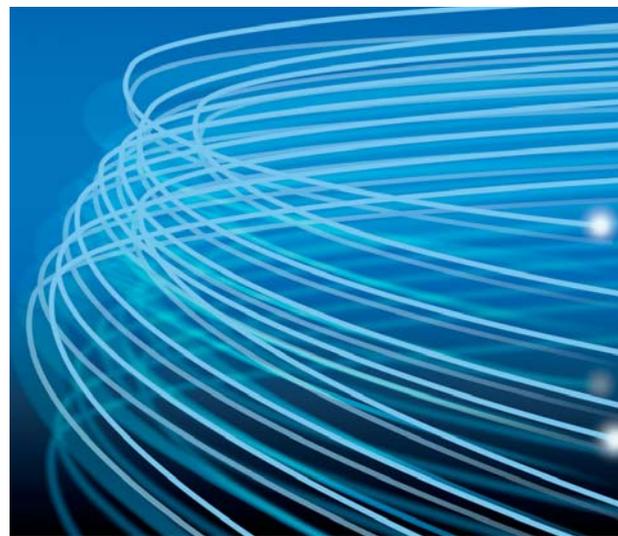
### Applications

Les réseaux de type FTTx sont utilisés pour améliorer les connexions Internet et donc s'appliquent à l'ensemble des secteurs d'activités pour lesquels Internet devient un mode de communication inévitable.

Si pour l'heure aucune application ne justifie des débits de plusieurs Gbps, le déploiement de réseaux FTTx permet d'anticiper les besoins futurs, notamment ceux relatifs au développement de services liés à la santé ou à l'éducation en ligne.

En parallèle, certains secteurs en particulier requièrent déjà des débits élevés et de la symétrie, comme le jeu en ligne, la visiophonie et la télévision (TVHD, vidéo à la demande, TV3D). Aujourd'hui, les acteurs du très haut débit misent beaucoup sur ces types de services pour valoriser leurs nouvelles infrastructures fibre optique à court et moyen terme.

Les déploiements FTTx ne sont cependant pas encore généralisés et, hormis dans les pays les plus avancés comme le Japon où le FTTx est désormais la technolo-



gie d'accès Internet la plus répandue (le nombre d'abonnés FTTx a dépassé le nombre d'abonnés DSL courant 2009), seules les zones les plus denses des territoires sont concernées. La très grande majorité des opérateurs impliqués dans le haut débit a aujourd'hui défini une stratégie très haut débit intégrant de futurs déploiements de réseaux FTTx. D'autres acteurs, notamment publics, sont également impliqués mais doivent encore trouver les bons modèles économiques et positionnements dans la chaîne de valeur pour assurer un certain équilibre entre niveau d'investissements et tarifs pratiqués.

Au cours du dernier semestre 2009, la croissance mondiale du marché FTTx s'est confirmée puisque l'on compte fin 2009 plus de 63 millions d'abonnés FTTx à travers le monde (ce qui représente une croissance supérieure à 16 % sur six mois). En France, on comptait quelques 308 000 abonnés FTTH/B pour plus de 5,7 millions de foyers raccordables fin 2009.

### Enjeux et impacts

La technologie permet d'apporter sécurité et confort des connexions Internet directement liées à des besoins sociétaux grandissants et permettront par exemple de :

- favoriser le lien social et l'inclusion par le partage de photos, de musique, jeux en ligne ;
- faciliter l'accès aux contenus éducatifs concernant la formation ;
- réduire les déplacements grâce à l'utilisation facilitée de la visiophonie ;
- rendre plus performantes les entreprises par le partage instantané de données, la mise en relation des acteurs, des *process* ;
- favoriser le développement du commerce en ligne ;
- faciliter l'accès aux services publics en lignes ;

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



- faciliter l'usage du «télétravail» avec des capacités de communications améliorées ;
- rendre possible un certain nombre de soins médicaux à domicile et ainsi limiter les déplacements de patient.

Elle permet de lever un verrou majeur dans la problématique de l'évolution des débits, qui sont de toute façon limités par les capacités des réseaux cuivre actuels. Il s'agit d'une technologie diffusante de part la pérennité du support physique considéré (la fibre optique), qui, lorsqu'elle sera largement déployée, permettra d'assurer la connectivité et d'améliorer les échanges avec un impact inévitable sur la performance des entreprises, l'accès aux services en ligne, à la connaissance et l'information, tout comme sur le déplacement de personnes

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D publique** : Ill-V Lab, LPN, XLIM, Ircica
- **R&D privée** : au niveau industriel, Alcatel Lucent ; au niveau des opérateurs télécoms : Numéricable, France Télécom/Orange, SFR, Free/Iliad ; au niveau des acteurs du génie civil et des opérateurs d'infrastructure : Vinci/Covage, LD Collectivités, Sogetrel, Nexans, etc.
- ARCEP, Associations type Avicca (villes de France), pôles de compétitivité (Systematic, etc.)

## Position de la France

Après certaines réticences de la part des opérateurs en raison des incertitudes réglementaires, les déploiements se sont accélérés courant 2009. L'implication de Numéricable, mettant à niveau son infrastructure en

« poussant la fibre » jusqu'aux immeubles dans ses foyers existants, a eu un effet considérable sur nombre de foyers.

Le rôle du régulateur est prépondérant et les autorités nationales s'impliquent pour définir des règles visant à assurer un déploiement relativement homogène sur l'ensemble du territoire et à éviter une nouvelle fracture numérique.

Malgré un niveau d'offres commerciales relativement proches du haut débit actuel, la pénétration reste faible au regard du niveau de la couverture. Ce constat peut être fait dans d'autres pays où les tarifs sont parfois plus élevés, ce qui peut être un frein supplémentaire.

Alcatel-Lucent fait incontestablement partie des principaux équipementiers FTTx au niveau mondial en concurrence avec les Chinois Huawei et ZTE. Il fournit des réseaux PON aux opérateurs tels que France Télécom et SFR en France mais également des références outre-mer comme Verizon aux États-Unis ou encore Hanaro Telecom au Japon.

## Analyse AFOM

### Atouts

Réglementation qui se précise, plusieurs acteurs impliqués et volontaristes.

### Faiblesses

Diversité des technologies mises en œuvre par les différents opérateurs, incertitudes quant aux possibilités de mutualisation des infrastructures.

### Opportunités

Programme national THD pour lequel le gouvernement va abonder à hauteur de 2 Md€..

### Menaces

Efforts à fournir pour améliorer le taux de pénétration de la technologie auprès des foyers raccordables, concurrence par les technologies mobiles de quatrième génération.

## Recommandations

Suivre le programme national THD (très haut débit), dont l'objectif est de raccorder 70 % des Français au THD en 2020.

Volets spécifiques des investissements d'avenir.

Résoudre l'équation économique.

Mettre l'accent sur la qualité de service et la garantie de la disponibilité du service (essentiel pour les entreprises). Se focaliser sur la commercialisation des offres fibre optique.

## Liens avec d'autres technologies clés

14

16

22

29

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 16. Objets communicants

### Description

Le concept d'objets communicants fait essentiellement intervenir des technologies de communication, telles que le RFID (*Radio Frequency Identification*), incluant notamment le NFC (*Near Field Communications*), les communications dites de courte portée (Bluetooth, ZigBee, UWB, etc.) et les technologies mobiles (cellulaires mais également satellites).

Pour l'heure, cette technologie très jeune (phase de lancement) est en forte croissance.

Les principaux leviers de croissance résident dans :

- les retours d'expérience réussis (satisfaction du consommateur via les économies réalisées) ;
- la régulation au sein des différents marchés verticaux favorisant l'automatisation ou incitant à plus de suivi ;
- le niveau de maturité des technologies utilisées (technologies peu coûteuses).

Néanmoins, il existe encore de nombreux points de blocage :

- investissement initial et coûts d'installation élevés ;
- améliorations techniques nécessaires sur le *roaming* (ou itinérance internationale) pour le M2M par exemple ou les interférences sur le RFID ;
- chaîne de valeur très fragmentée avec une myriade d'acteurs (souvent PME voire TPE), pouvant mener à une identification plus complexe des fournisseurs et donc à une intégration technique plus difficile ;
- performances techniques pures autour de la sécurité des données (au niveau de l'accès), de la qualité de service (*end-to-end*), de la standardisation (favorise la massification).

### Applications

Cette technologie est utilisée dans plusieurs marchés verticaux à travers diverses applications :

- automobile/transport (télématique, gestion de flotte, logistique, etc.) ;
- énergie (télérelève de compteurs, smart grid, etc.) ;
- sécurité (télésurveillance, alertes, etc.) ;
- industrie (logistique, traçabilité, etc.) ;
- commerce de détail (paiement mobile, logistique, terminaux de paiement, etc.) ;
- électronique grand public (avertisseurs de radars, livre électronique, navigateurs GPS connectés, etc.) ;
- santé (e-santé).

L'objectif principal de ce type de technologie est de réduire les coûts opérationnels via l'automatisation, la réduction des déplacements et la réduction des erreurs. Les entreprises utilisatrices espèrent donc un retour sur investissement (ROI) rapide. Néanmoins, à plus long terme, certaines d'entre elles comptent générer des revenus significatifs

supplémentaires grâce à cette technologie en proposant de nouveaux services (service client, maintenance préventive, facturation à l'usage, etc.).

L'intégration de la technologie dans les processus ne se fait pas de façon automatique. Elle requiert le plus souvent une éducation-formation pour maîtriser les capacités du M2M ou du RFID et en profiter. Un certain temps d'adaptation est parfois nécessaire quant à la mise en œuvre de la technologie (problèmes lors de l'installation, taux d'erreurs plus importants que prévus). Ceci a donc un impact sur les processus en interne mais également sur le système d'information lui-même. Celui-ci doit intégrer de nouvelles données (engendrant donc de nouveaux coûts) et voit l'établissement de nouveaux modèles économiques avec un impact sur le service client. Par ailleurs, la réduction de coûts engendrée par la mise en place de la technologie est aussi une réduction de coûts en termes de ressources humaines.

Selon l'Idate, le marché total (matériel, connectivité, et services) du M2M devrait atteindre 14 Md€ en 2010 et 32 Md€ au niveau mondial en 2014. Selon le cabinet IDTechEx, le marché du RFID s'élevait à 5 Md\$ en 2008 avec 2,16 milliards de tags. Les projections font état d'un marché évalué à 17 Md\$ en 2013.

### Enjeux et impacts

La technologie répond aux enjeux sociétaux suivants :

- développement durable grâce aux applications de télérelève et *smart grid* permettant un meilleur contrôle des consommations énergétiques ;
- sécurité des biens, des personnes (physique ou alimentaire) et du territoire, grâce à un suivi à distance ;
- vieillissement de la population, avec des solutions d'e-santé permettant le maintien à domicile tout en maîtrisant les coûts.

Il s'agit d'une technologie diffusante car elle s'appuie sur des technologies matures, et elle se déploie dans le temps de manière croissante et durable.

Plusieurs effets positifs sont attendus notamment en termes de :

- productivité (plus d'automatisation) ;
- consommation énergétique (réduction des transports humains facilitée par les communications entre objets-machines, suivi de la consommation en temps réel permettant d'adapter les usages) ;
- fiabilité des produits et des processus (meilleure logistique, signalisation des pannes, etc.).

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D publique** : laboratoire LRIT, CEA-LIST, CEA-Leti LIG, Irit, LAAS, LIP6, RFTLab, Inria, Irisa, etc.
- **R&D privée** : France Telecom, SFR, Bouygues Telecom, Gemalto, Oberthur Technologies, Kerlink, SagemCom, Erco Gener, Violet, Tagsys, ASK, Withings, etc.
- **Pôles de compétitivité** (Images et Réseaux, Cap Digital, Systematic, Minalogic, SCS, AESE, etc.), association RFID Bretagne Développement, Centre National RFID, Forum des services mobiles sans contact, etc.

## Position de la France

Les acteurs français sont très présents et sur plusieurs maillons de la chaîne de valeur : le français Gemalto a racheté en juin 2010, Cinterion, leader mondial des fabricants de modules M2M ; Orange est très impliqué sur les problématiques de standardisation avec la présidence de l'Etsi (organisme de standardisation européen) sur la thématique M2M. Orange est également impliqué sur l'Internet des objets puisqu'il a été sélectionné pour mettre en œuvre une racine ONS (système de nommage pour les objets, équivalent au DNS pour le web) en France, posant ainsi la première brique d'un futur Internet des objets sur la base du réseau EPCglobal. La plateforme développée par GS1 France (entité française d'EPCGlobal) et Orange Business Services dépasse les frontières hexagonales et se positionne comme l'ONS Root Européen.

Le régulateur Arcep est également très impliqué puisqu'il reste l'un des seuls (avec la CMT en Espagne) à prendre en compte le niveau d'avancement du M2M.

## Analyse AFOM

### Atouts

Plusieurs acteurs impliqués (notamment opérateurs) et volontaristes ; forte concurrence avec un impact sur les prix permettant une meilleure adoption ; de nombreux grands comptes intéressés par une telle technologie (automobile, aviation, énergie, transport, etc.) ; arrivée de l'électronique grand public connectée (livres électroniques, etc.) permettant une adoption massive plus rapide.

### Faiblesses

La crise a eu un effet retardateur sur le niveau de déploiement et donc sur l'adoption, et les retours sur investissements restent encore plus incertains en temps de crise. Par ailleurs, de nombreux efforts sont à fournir dans l'IHM pour favoriser les usages.

### Opportunités

Régulation et politiques publiques incitatives par secteur vertical ; développement de solutions plus fiables (qualité de service, sécurité) et plus complètes (*roaming*) ; appel à projet national « Usages innovants de la RFID et services mobiles sans contacts » lper-SMSC.

### Menaces

L'Arpu reste encore très faible pour les opérateurs, limitant leur implication à court terme (pas encore d'investissement dans un réseau dédié).

## Recommandations

Les aspects relatifs à la normalisation auront un effet accélérateur sur le développement de la technologie. En effet, la standardisation rassurera les clients sur la compatibilité de la technologie et entraînera sa promotion par tous les industriels.

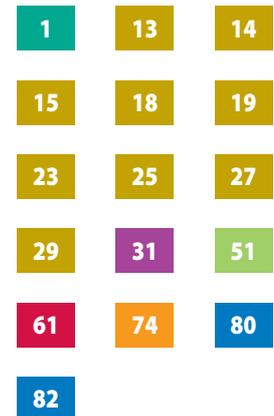
Les problèmes de sécurité liés d'une part, à la diffusion non maîtrisée d'informations, ainsi que d'autre part, aux attaques informatiques (attaques directes, virus, etc.), devront être étudiés.

Les aspects liés à la protection de la vie privée devront être transparents afin de dissiper toute possibilité de violation des ces données (accès, stockage, détournement de ces données) et renforcer ainsi le développement des usages.

Il sera important de travailler sur l'intégration matériel-logiciel ainsi que sur la problématique d'interopérabilité.

La fiabilité des réseaux de capteurs sans fils devra faire l'objet d'une attention particulière tout comme leur tolérance aux fautes.

### Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 17. Technologies 3D



### Description

Les technologies 3D regroupent ici deux grands ensembles de technologies distinctes :

- la vidéo 3D relief, permettant d'offrir aux utilisateurs une immersion visuelle stéréoscopique : grâce à la projection d'images 3D et au port de lunettes spécifiques (sauf dans le cas d'écrans autostéréoscopiques), l'utilisateur est immergé dans l'image ;
- la réalité virtuelle, domaine scientifique et technique ayant pour objectif de simuler, dans un monde entièrement virtuel, le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou plusieurs utilisateurs en immersion pseudo-naturelle.

Avec l'arrivée de la 3D, la chaîne technique audiovisuelle doit s'adapter. Le principal point en suspens reste le format d'image retenu en l'absence de standard dans l'industrie. De plus, pour apprécier la 3D, le consommateur final doit s'équiper d'un nouvel écran (téléviseur-moniteur) compatible.

Les problématiques majeures de la réalité virtuelle sont quant à elles à la fois liées à la création du monde virtuel et à l'interfaçage entre le sujet et le monde virtuel :  
 • il faut modéliser et traiter informatiquement un monde virtuel évoluant en temps réel. Or les modèles peuvent être simplement descriptifs, au comportement déterministe, ou autonomes ce qui induit des temps de calcul généralement très importants ;

- dans les cas de la réalité virtuelle, les technologies 3D sont généralement propriétaires et faiblement interopérables ;
- la 3D sur le web doit encore faire face à la complexité technico-économique de la création de contenus 3D dans un environnement temps réel ;
- la complexité de la 3D est accrue sur mobile, du fait des processeurs plus lents sans carte graphique, mais la situation devrait progressivement s'améliorer avec l'accroissement des performances des terminaux ;
- enfin, le coût des équipements reste encore relativement élevé même si les coûts ont quelque peu baissé, notamment grâce à l'industrie du jeu vidéo qui a permis de réduire les coûts de cartes graphiques.

D'un point de vue connexe, la réalité virtuelle peut être associée à la réalité argumentée. Cette technique permet de financer des informations mesurées, évaluées sur des objets modélisés.

### Applications

L'industrie du jeu vidéo a permis de démocratiser la réalité virtuelle auprès du grand public.

Le succès des films d'animation en 3D, ainsi que la sortie prochaine de consoles de jeu vidéo 3D comme la Nintendo 3DS permet au grand public de se familiariser progressivement avec la 3D relief.

Mais au-delà de l'univers des loisirs, la 3D et la réalité virtuelle, sous leurs formes les plus simples comme les plus sophistiquées, deviennent progressivement des outils de travail parmi d'autres dans les entreprises :

- modélisation, prototypage virtuel, maquette numérique (industrie, architecture, urbanisme) ;
- simulation des processus de production, permettant de visualiser les activités, les contraintes et les risques ;
- formation professionnelle par le biais des *serious games* ;
- formation par simulateur (conduite de véhicules, aéronautique, médecine) ;
- téléprésence et visiophonie ;
- visualisation scientifique (visualisation du système nerveux central en 3D par exemple).

Après le son, l'image et la vidéo, le Web s'enrichit également de représentations totales ou partielles (objets) en 3D temps réel.

S'il n'existe pas de chiffres précis, le potentiel de la réalité virtuelle se chiffre d'après les spécialistes en milliards de dollars. À lui seul, le secteur des jeux vidéo a généré près de 51 Md€ dans le monde en 2009 selon l'Idate.

Les marchés du *serious game* et de la réalité augmentée sur mobile devraient connaître une croissance significative à moyen terme, avec respectivement 10,2 Md€

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

en 2015 (1,5 Md€ dans le monde en 2010) et 732 M\$ dans le monde en 2014 (2 M\$ d'après JuniperResearch en 2010).

Enfin, concernant la vidéo 3D relief, iSuppli prévoit que 4,2 millions de TV 3D devraient être commercialisées en 2010 dans le monde.

## Enjeux et impacts

Si l'ensemble de la chaîne technique dans le cinéma 3D semble répondre aux problématiques posées par la 3D, au vu de l'accroissement du nombre de films produits et de l'équipement des salles, l'horizon de la télévision 3D semble moins clair. Les contenus sont rares, les modèles économiques non établis et le niveau d'équipement des ménages en équipements terminaux compatibles est faible.

Quant aux enjeux liés à la diffusion de la réalité virtuelle, ceux-ci sont multiples :

- amélioration de la sécurité au travail et diminution des risques ;
- diminution des coûts de production grâce à la faculté d'anticiper dès la phase de conception des produits les difficultés liées aux cas complexes d'assemblage ;
- augmentation de l'attrait et de l'efficacité des formations par rapport aux méthodes traditionnelles ;
- thérapies comportementales de personnes malades (traitement des phobies, anxiétés, dépression) ;
- tourisme, visualisation de représentations 3D de territoires urbains de grandes dimensions (Google Earth, Ville en 3D de PagesJaunes, etc.).

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D publique** : Clarte, INT-Artemis, Irisa, CEA-List, Centre Européen de Réalité Virtuelle (CERV), Centre de Réalité Virtuelle de la Méditerranée (CRVM), IGN, Inria-Labri, INRS, Ircam, LIMSI, LRI, CSTB, etc.
- **R&D privée, réalité augmentée, réalité virtuelle** : Dassault Systèmes, Technicolor, Orange Labs, EADS, Thales, CS Communication & Systèmes, Ubisoft, SC2X, MASA Group, Immersion, Archivideo, Alioscopy, TechViz, Virtual I.T., Vertice, Haption, XD Productions, Optis, Simtean, Lumiscaphe, Genesis, Darkworks, TriOviz, Total Immersion, présence de petits acteurs comme Int13, Presselite, Niji, AFRV, APRV (Clermont- Ferrand), SELL, SNJV, SPFA, pôles de compétitivité (Images et Réseaux, Systematic, Imaginove, Cap Digital, EMC2 et Advancity), etc.

## Position de la France

La France bénéficie de la présence de plusieurs acteurs majeurs :

- Dassault Systèmes, leader mondial des solutions 3D et de gestion du cycle de vie des produits ;
- Thales, expert reconnu pour ses simulateurs de vols, ses systèmes d'entraînement et de formation et ses outils de modélisation ;
- Technicolor, qui se positionne sur le cinéma 3D, notamment en post-production.

La recherche française est au plus haut niveau, aux côtés des Américains, des Allemands ou encore des Japonais.

Relativement répandue au sein des grandes entreprises (Peugeot PSA Citroën, EDF, SNCF, etc.), la réalité virtuelle est toutefois encore peu utilisée par les PME.

Les *serious games* sont de plus en plus pris en compte dans le milieu professionnel, et principalement chez les PME encore peu sensibilisées à ces outils.

## Analyse AFOM

### Atouts

De grands leaders français, un tissu de PME particulièrement dynamique, une recherche française visible au niveau international et qui bénéficie de liens avec les entreprises.

### Faiblesses

Coût encore élevé des solutions de réalité virtuelle ; faible diffusion au sein des PME ; manque d'équipement des ménages en terminaux 3D.

### Opportunités

Réalité augmentée sur mobile ; 3D relief pour le cinéma et l'industrie du jeu vidéo.

### Menaces

Pas de standard sur la vidéo 3D ; industrie grande consommatrice de calcul engendrant des coûts importants ; risque d'augmentation de la fracture numérique (hausse significative des débits).

## Recommandations

Favoriser l'émergence d'un standard unique afin de ne pas renouveler la guerre de format HD et permettre à toute la chaîne de valeur de se structurer.

Mutualiser les infrastructures afin de baisser les coûts. Soutenir des appels à projets communs comme celui d'Oséo et du CNC destiné aux PME du multimédia et de l'audiovisuel.

## Liens avec d'autres technologies clés

18

24

29

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



# 18. Interfaces homme-machine

## Description

Les interfaces homme-machine utilisent un ensemble de technologies très diverses, qui utilisent des logiciels et des algorithmes en association avec des équipements très variés. Ainsi, les technologies d'IHM relèvent de plusieurs axes technologiques :

- les interfaces matérielles : joysticks, claviers, souris, écrans tactiles, télécommandes, manettes (spécifiques ou utilisées dans le jeu vidéo comme la wiimote de la console Wii de Nintendo) interfaces haptiques (ou à retour d'effort), caméras, microphones, moyens d'affichage (écrans, casques de visualisation, affichage holographique, etc.), tablettes de saisie, capteurs biométriques ou biomédicaux, etc. ;
- la conception des interfaces : ergonomie, design, psychologie cognitive, adaptation au contexte à partir d'hypothèses, etc. ;
- l'électronique et l'informatique de gestion des interfaces.

Les interfaces homme-machine existent depuis longtemps en ce qui concerne les interfaces avec les programmes informatiques. Une offre complémentaire s'est développée concernant les interfaces liées à Internet, avec de très nombreux usages dont le téléenseignement, le travail coopératif à distance et bien d'autres.

Grâce à la multiplication des logiciels embarqués et des microprocesseurs dans les équipements autres que des ordinateurs, les IHM se sont multipliées et enrichies. Les jeux vidéo constituent un facteur majeur d'innovation en introduisant de nouvelles techniques d'interaction (Wii de Nintendo, Kinect de Microsoft, PS3Move de Sony).

Les domaines algorithmiques et informatiques couvrent par ailleurs de nombreuses fonctions, parmi lesquelles on peut citer l'analyse et la compréhension des demandes d'un utilisateur humain à travers son observation (gestes, paroles, émotions), simulation et modélisation, manipulation et synthèse d'images 3D, prise en compte du temps réel, gestion d'interface « rich media », de widgets, etc.

Il faut ajouter les interfaces dites « surface computing », dont le multi-touch d'Apple, le tableau noir interactif, l'écran Surface de Microsoft, mais aussi les murs d'images interactifs.

Au-delà de ces diverses interfaces spécialisées, se développent des recherches dites multimodales permettant une immersion totale ou partielle dans un monde virtuel, avec des applications multiples. En effet, les plateformes de réalité virtuelle permet d'immerger l'utilisateur et de lui offrir une interaction intuitive avec l'environnement : grâce à un système de capture de mouvements (caméras infrarouges qui mesurent les mouvements de mar-

queurs posés sur l'utilisateur, gant de données, interfaces haptiques, etc.), les images sont recalculées en temps réel pour correspondre au point de vue de l'utilisateur et/ou s'adapter aux mouvements réalisés avec son corps (mouvement des doigts, des mains, des jambes, etc.). Des interfaces utilisateurs plus classiques de type clavier, souris ou manette peuvent néanmoins être utilisées. La parole peut également être utilisée, aussi bien pour commander que pour communiquer de la machine vers l'utilisateur.

## Applications

Il existe une offre importante d'outils d'aide aux développements d'IHM. Elle fait partie d'offres globales de grands acteurs de l'informatique comme Microsoft, Borland, IBM, Google ou Adobe. Au delà de ce marché, il existe une offre de service importante. Existent également des logiciels spécialisés pour la modélisation, la simulation et la génération d'interfaces dédiées à différents types d'équipements.

Les IHM sont centrales pour de nombreux secteurs d'application : électronique grand public, environnements industriels, automobile, défense, aéronautique, éducation, formation, travail coopératif etc.

Dans le domaine matériel, l'usage des interfaces haptiques se développe. Un volant, un gant, un bras haptique ou une manette à retour de force servent à recréer les effets de résistance liés à la conduite d'un avion ou d'une voiture, mais aussi d'une opération chirurgicale ou à la télémanipulation dans un milieu hostile.

Les interfaces neuronales directes viennent par ailleurs d'atteindre aux États-Unis le stade des toutes premières applications commercialisées (jeux vidéo, aide au handicap : écriture directe de texte).

En ce qui concerne les équipements, le marché des écrans tactiles est en forte croissance grâce au succès de terminaux comme l'iPhone, la Nintendo DS ou plus récemment l'iPad. Selon iSuppli, le marché des écrans tactiles a atteint, en 2008, 341 millions d'unités et 3,4 Md\$ en valeur et atteindrait 6,4 Md\$ en 2013 pour 833 millions d'unités. En 2009, l'office des brevets américains a décidé d'attribuer à Apple un brevet à une couverture très large sur l'interface *multi-touch* de l'iPhone.

## Enjeux et impacts

Il s'agit d'une technologie à très fort potentiel diffusant. Les enjeux sont multiples :

- les IHM facilitent, voire permettent le développement de produits, outils ou services innovants, dans l'ensemble des secteurs. L'usage de la réalité virtuelle permet de plus la conception d'IHM plus intuitives ;

### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



- elles sont un enjeu de productivité, notamment pour l'efficacité de l'usage de logiciels complexes. Elles constituent également un outil de compétitivité, car l'interface joue un rôle dans la décision d'achat d'un produit. Les producteurs d'automobile haut de gamme considèrent l'IHM comme une part stratégique de leur offre, qui fait partie de l'image liée à la marque, et est souvent développée en interne ;
- les IHM jouent également un grand rôle en matière de sécurité. En effet, le design et l'ergonomie d'un système peuvent avoir un rôle critique dans la prise en main d'un outil, l'efficacité d'une tâche à réaliser, le taux d'erreur de l'opérateur, etc. ;
- les IHM peuvent créer de nouveaux types de relation entre l'homme et les équipements qu'il utilise, en augmentant la « compréhension » par la machine des demandes humaines, mais aussi en facilitant le contrôle par l'homme de la machine. Cela peut faciliter l'accès à des services vers un plus grand nombre de personnes, personnes âgées ou handicapées notamment. Cela peut également modifier la façon dont nous jouerons, dont nous communiquerons et dont nous travaillerons ;
- le développement des espaces numériques de travail (ENT) sont un grand enjeu pour l'éducation et la formation.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D publique** : Inria, CEA, Télécom Paristech, l'Inserm, LIRMM-IHMH, Cena-PIL, Ircam, Institut de la Cognitique à Bordeaux (ENSC), Paris 8, LIMSI, etc.
- **R&D privée** : Orange Labs, Stantum Technologies, IntuiLab, Haption, Andelia, Axance, groupe Guillemot Corporation, Vocally, Kayentis, Immersion, etc.
- Logiciels professionnels la société PC Soft et de nombreuses sociétés de services
- AFIHM (Association francophone d'interaction homme-machine), pôles de compétitivité (Images et Réseaux, Imaginove, Systematic, Cap Digital Minalogic, Mov'eo), etc.

## Position de la France

Présence d'une recherche importante sur les diverses technologies utilisées dans les IHM.

Présence de sociétés et d'agences offrant services et produits avec une expertise forte, combinant ergonomie, design et technologie, notamment sur Internet.

Position plus faible dans les logiciels d'entreprise.

### Liens avec d'autres technologies clés

17

29

61

73

84

## Analyse AFOM

### Atouts

Existence d'une industrie de la défense et des jeux vidéo, compétences en médecine, en sciences cognitives, etc.

### Faiblesses

Les designers sont peu sollicités en amont.

### Opportunités

Beaucoup de synergies avec des activités proches : téléprésence, réalité virtuelle, robotique, RFID ; fortes avancées en reconnaissance vocale et en réalité augmentée ; enjeu important pour l'éducation et la formation.

### Menaces

Domination des États-Unis pour la partie logicielle.

## Recommandations

Encourager la structuration de la recherche au niveau de la conception et du design de systèmes fortement automatisés prenant en compte le facteur humain (psychologie cognitive, sociologie, physiologie, etc.).

Penser à solliciter les designers en amont dès la phase de conception.

Une mise en œuvre appropriée de techniques IHM spécifiques est essentielle pour le développement de l'environnement numérique de travail (ENT), qui vise l'ensemble de la communauté éducative.

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



# 19. Ingénierie de systèmes complexes et systèmes de systèmes

## Description

Un système de systèmes (SdS) est un ensemble de systèmes autonomes interconnectés et coordonnés pour satisfaire une capacité et/ou réaliser un ensemble d'effets prédéterminés qu'aucun des systèmes constitutifs ne peut assurer seul. Une autre définition peut-être l'intégration de systèmes multiples afin de réaliser le comportement désiré de l'ensemble du système. L'ingénierie des systèmes de systèmes est un ensemble de *process* de développement, outils et méthodes pour designer, redesigner et déployer des systèmes de systèmes.

On parle de système complexe lorsqu'il devient très difficile de prévoir le comportement du système par le calcul. Ces méthodes fortement utilisées au niveau militaire et spatial sont de plus en plus appliquées et applicables au domaine civil (transport, santé, réseaux de télécommunications, exploration spatiale etc.). Un consensus général estime que l'ingénierie de systèmes traditionnels a atteint ses limites en terme de capacité à résoudre les problèmes d'intégration complexes.

L'informatique et les mathématiques avancées fournissent des solutions pour résoudre une partie de cette complexité. Ainsi ces systèmes complexes sont assez liés aux systèmes d'intelligence artificielle en particulier les systèmes multi-agents.

## Applications

Les applications sont nombreuses dans des domaines où la France est un acteur reconnu : électronique, industrie des télécoms, IT, défense, nucléaire, environnement, transport, santé, recherche spatiale, énergie...

De nombreux secteurs sont susceptibles d'utiliser l'ingénierie des systèmes complexes, mais son coût et sa maîtrise délicate la cantonne dans les solutions les plus pointues et les plus génératrices de valeur ajoutée.

Les mathématiciens français sont réputés pour la qualité de leurs algorithmes financiers et leurs capacités à optimiser ces mêmes réseaux financiers.

La génétique est un autre exemple de système complexe où les capacités de calcul ont permis à l'industrie de faire des avancées notables.

IBM et le gouvernement Irlandais utilisent la connaissance des systèmes complexes du premier pour optimiser les ressources de pêche du second.

Une autre application civile, avec un impact sociétal fort, est le projet *GAIA Virtual Sky* de Steria qui offre, par exemple, la possibilité d'optimiser différents processus de vol afin d'économiser la consommation d'énergies fossiles, etc.

En France, le SIGLE (Système de gestion logistique) de la Marine nationale est un système complexe de maintien en conditions opérationnelles. Sa complexité faisait que les bâtiments n'étaient opérationnels qu'à 55 %. Avec une approche méthodologique et outillée, une jeune pousse lyonnaise (rachetée depuis par SQLI) a fait grimper ce taux jusqu'à quasiment 70 %...

## Enjeux et impacts

L'ingénierie des systèmes de systèmes permet de répondre à des enjeux sociétaux, économiques et politiques de plus en plus complexes via la mise en partage des différents systèmes et ressources d'acteurs verticaux afin d'améliorer les processus et les produits pour ce secteur donné.

Cette approche, qui touche à quasiment tous les types de technologies, exige des profils de très haut niveau, métiers, informatique et organisationnels.

La maîtrise des systèmes complexes et leur ingénierie va devenir de plus en plus essentielle à mesure que la compétition s'étoffe, que la complexité de notre environnement s'accroît et qu'un seul acteur ne peut répondre seul à toutes les problématiques posées par son secteur.

C'est en maîtrisant un des systèmes les plus complexes qui soit, tant technique qu'organisationnel, à l'aide d'un système d'information solide qu'Airbus a pu développer l'A 380.

C'est une technologie essentiellement basée sur les services : organisation, modélisation, ingénierie, informatique, réseaux...

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Inria, CEA-Leti, RNSC, CNRS (LAAS), École Polytechnique, Centrale Paris, CNRS LIRM, Systematic, Lips6, Cemagref, LySic, Université Paris 7
- **Éditeurs** : Ipanema, Oslo Software
- **SSII** : Altran, Akka, Alten, Steria, SQLI, Atos Origin, Groupe Helice, Ausy, Cybernetix
- **Utilisateurs** : EDF, EADS, Sagem, DCN, Dassault Aviation, Thales, Schneider Electric, Alcatel-Lucent, Vinci, Areva...

### Degré de diffusion dans l'absolu

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Liens avec d'autres technologies clés

20

21

27

47

52

62

69

## Position de la France

La France a une longue tradition et une solide expérience d'ingénierie et de maîtrise de systèmes et de systèmes complexes.

Une bonne partie des points forts de l'économie française fait appel aux systèmes de systèmes et aux systèmes complexes.

La France dispose aussi d'une bonne école de mathématiques ainsi que de plusieurs instituts qui forment spécifiquement à ces approches.

## Analyse AFOM

### Atouts

Expérience, importantes industries clientes, école de mathématique, intelligence artificielle.

### Faiblesses

Discipline qui reste méconnue, difficulté à fédérer les parties prenantes pour monétiser des projets pilotes.

### Opportunités

Reconnaissance plus importante sur le marché, développement vers de nouveaux secteurs cibles : distribution, jeux en ligne, marketing...

### Menaces

La perte de nos capacités en mathématiques, nombre de compétences.

## Recommandations

Favoriser la collaboration entre les laboratoires publics, les PME innovantes et les grands comptes.

Disséminer plus largement ces concepts au sein des autres technologies.

Encourager la formation.

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 20. Calcul intensif

### Description

Depuis l'invention de l'ordinateur, on n'a cessé de vouloir augmenter ses performances, en particulier pour répondre aux besoins des secteurs les plus exigeants tels que le nucléaire ou le militaire.

L'augmentation des capacités de calcul conformément à la loi de Moore (doublement tous les deux ans) et la baisse du coût relatif de la puissance de calcul ont offert la possibilité aux entreprises de s'équiper avec des matériels informatiques suffisamment puissants pour utiliser des logiciels de simulation particulièrement gourmands en opérations.

Le calcul intensif, ou calcul à haute performance (HPC, *High Performance Computing* en anglais) est le processus d'utilisation de systèmes informatiques très avancés pour effectuer des tâches ou résoudre des problèmes complexes. Cette informatique se différencie de l'informatique classique qui est plus orientée transactions que puissance brute de calcul.

Le calcul intensif se base sur deux types d'architectures :

- les macroordinateurs ;
- les grilles de calcul, qui sont l'architecture la plus performante à l'heure actuelle.

Il existe trois types de calcul :

- le calcul vectoriel, qui était réservé aux macroordinateurs mais qui a été remis au goût du jour par les puces issues du monde du jeu vidéo ;
- le calcul parallèle ;
- la fusion de ces deux approches.

Le calcul intensif est basé sur des « super calculateurs », des machines fortement optimisées, intégrées à tous les niveaux (composants, bus, mémoires, entrées-sorties, etc...) et souvent conçus pour des tâches spécifiques.

Avec l'atteinte des limites de la loi de Moore, l'augmentation de la puissance de calcul réside dans la multiplication du nombre de cœurs, et en particulier pour le calcul intensif, dans le développement d'architectures massivement parallèles (jusqu'à plusieurs centaines de milliers de processeurs). Les architectures fortement distribuées, en grille et dans le « nuage » permettent aussi la création de capacités de calcul intensif à partir de matériels peu intégrés et totalement banalisés, comme un PC ou un serveur virtuel.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Applications

Les applications du calcul intensif concernent essentiellement la simulation et la recherche.

La simulation numérique désigne le procédé de représentation d'un phénomène physique. Elle exige une étape préalable, celle de la modélisation (traduction d'un



phénomène en langage mathématique).

On peut distinguer trois types de simulation :

- la simulation de conception qui s'effectue à partir d'une représentation approchée produite par la maquette numérique (CAO). Domaines d'applications : la mécanique, la mécanique des fluides, la science des matériaux...
- la simulation prédictive (simulation des phénomènes). Cette simulation exige une architecture déployant une grande puissance de calcul. On parle d'architecture parallèle. Domaines d'applications : nucléaire, météorologie...
- la simulation comportementale est une approche multi-agent consistant à décrire le comportement de chaque entité qui s'adapte à la situation courante. Domaines d'applications : systèmes complexes (trafics routiers, phénomènes biologiques et sociaux).

Pour la recherche, les applications sont tout aussi vastes : criblage statistique, synthèse de nouvelles molécules, recherche spatiale...

D'autre part, les applications tertiaires sont un des domaines qui se développent le plus rapidement du fait de la démocratisation des capacités de calcul et aussi, car ceux qui les possèdent ont maintenant la possibilité (offerte par les technologies du nuage) de les partager en toute sécurité avec des utilisateurs tiers. Les domaines les plus en vue sont :

- décisionnel en temps réel ;
- analyse prédictive fine des comportements humains ;
- marketing relationnel ;
- calcul, analyse financière...

### Enjeux et impacts

Le calcul intensif est un outil de souveraineté et de compétitivité nationales. Depuis 2007, la France et l'Europe l'ont bien compris et rattrapent leur retard avec plusieurs initiatives communes comme le Genci et Prace.

Le calcul intensif est très important pour la France, car ses industries de pointe en sont très consommatrices :

énergie, nucléaire, militaire, aérospatial, automobile... Cependant, les investissements correspondants sont très onéreux.

À titre d'exemples, le calcul intensif permet :

- d'éviter les essais physiques, (comme par exemple les essais nucléaires militaires) ;
- de réduire les coûts de prototypage nécessaires aux développements de nouveaux produits, et le délai de mise sur le marché (ainsi Renault a réduit de 50 % le temps de développement d'un nouveau véhicule) ;
- une optimisation des ressources et donc un accroissement de la productivité des entreprises, comme par exemple l'optimisation de la chaîne logistique des grands distributeurs.

Le développement d'architectures massivement parallèles basées sur des microprocesseurs banalisés induit un déplacement de la création de valeur et des verrous technologiques, susceptible de rebattre les cartes au niveau mondial. Ce tournant nécessite un vaste effort de R&D afin notamment de concevoir des logiciels adaptés à ces nouvelles architectures.

La démocratisation du calcul intensif se poursuit également par l'accès en ligne à ces outils en particulier en mode nuage. En ce sens, l'accès pour les PME à des capacités de calcul intensif est et sera, de plus en plus important pour leur compétitivité.

La dissipation thermique du calcul intensif, l'optimisation de la consommation et du refroidissement sont également des enjeux techniques forts pour cette filière.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- Genci (dont dépendent le CCRT, le Cines et l'Idris), Teratec (Systematic), CNRS (IDRIS & INS2I), École Polytechnique (LIX), Aerospace Valley, Minalogic
- CEA, EADS, Dassault Aviation, Snecma, Total, Thales, Areva...
- Bull, Schneider Electric
- Dassault Systèmes
- Ansys, HPC Project, CAPS, ActiveEon, Distene, Adacsys, Scilab Entreprises, Sogeti High Tech, Oxalya, Akka Technologies, Easy Group, etc.

## Position de la France

La France dispose d'atouts solides : une école mathématique et des laboratoires publics reconnus, la maîtrise technologique de la conception des architectures de calcul intensif, un tissu industriel actif regroupant des fournisseurs de certaines technologies et des utilisateurs de

calcul intensif. La France bénéficie de l'expérience de ses industries de défense, aérospatiale et nucléaire.

En revanche, la France dispose de peu de capacités de production de composants matériels.

La France a lancé plusieurs initiatives importantes pour rester dans le peloton mondial :

- projet européen Egi-Inspire, de grille de calcul distribuée à partir de PC mis en réseaux, et pouvant être utilisé par les centres de recherche. Le chef de file français est le CNRS ;
- Genci : Grand équipement national de calcul intensif (représentant français au sein du programme européen Prace) pour la recherche et pour partager des capacités de calcul entre centres de recherche français ;
- Teratec : pôle fédérateur pour le calcul intensif créée par le CEA et englobé dans Systematic. Ce centre est en train de déployer le TGCC qui abrite le Tear 100, le plus puissant ordinateur d'Europe. Teratec veut démocratiser l'usage du calcul intensif notamment par les PME.

## Analyse AFOM

### Atouts

Industries clientes puissantes et de pointe au niveau mondial, bons mathématiciens français, systèmes complexes, intelligence artificielle, logiciel libre.

### Faiblesses

Maîtrise de la couche matérielle.

### Opportunités

Calcul distribué en architecture nuage sur composants totalement banalisés.

### Menaces

Arrivée d'offres qui sont de plus en plus industrialisées de la part d'acteurs américains que ce soit du super ordinateur (IBM) ou du nuage (Amazon).

## Recommandations

Comme dans tous les pays développés, l'importance des investissements rend quasiment obligatoire l'intervention de l'État.

Collaboration européenne au niveau de la recherche et des partenariats public-privé.

Il est nécessaire de pérenniser le GENCI, car le calcul intensif sera toujours très important à l'avenir.

Développer les formations et les compétences.

Intensifier le couplage entre la recherche publique et les entreprises en particulier les PME.

Pérenniser l'industrie française du calcul intensif, en particulier l'intégration de systèmes.

## Liens avec d'autres technologies clés

1

23

26

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



## 21. Progressive/Intelligent Manufacturing

### Description

Afin d'engendrer des gains de productivité significatifs, l'informatique dans les usines doit gagner en agilité, en intégration, en automatisation et en intelligence entre les multiples fonctions qui la composent. Pour ce faire, beaucoup de solutions développées pour l'informatique de gestion peuvent être adaptées à l'informatique de production.

Un système de production a donc une dimension technique et une dimension économique.

La dimension technique comprend les éléments suivants :

- le PLM (*Product Lifecycle Management*) qui englobe les outils de conception, de gestion des données et de collaboration ;
- la CAO (Conception assistée par ordinateur). La CAO mécanique regroupe tous les logiciels destinés à la modélisation ou à la définition. La CAO électronique regroupe tous les logiciels d'étude, d'analyse utilisés dans les étapes de conception logiques ou physiques des circuits, qu'il s'agisse de circuits imprimés, intégrés ou spécifiques, ou encore de systèmes électroniques ;
- le PDM (*Product Data Management Systems* ou Système de gestion des données techniques) regroupe tous les logiciels et toutes les procédures permettant aux industriels de gérer les données d'ordre technique, que ces dernières soient liées à la définition des produits conçus par l'entreprise ou liées aux procédés utilisés pour les fabriquer. Un système de PDM est un lieu de convergence et un outil d'intégration des informations provenant des différents systèmes informatiques de l'entreprise ;
- la simulation permet de développer des solutions de manière virtuelle ; sa maîtrise est également un important facteur de compétitivité, car elle permet de repousser sans cesse la limite technique et scientifique pour que

le virtuel parvienne à représenter le réel de manière la plus exacte possible. La simulation enregistre des avancées très fortes, grâce à la disponibilité de capacités de calcul haute performance, le développement de logiciels et solveurs capables de coopérer pour prendre en charge des problèmes multiphysiques et multiéchelles et l'émergence en France de pôles de compétence capables de faire le lien entre les problèmes concrets des entreprises et les capacités logicielles et matérielles les plus avancées disponibles (Teratec, EHPOC, CSDL, IOLS).

La dimension économique est composée des éléments suivants :

- le MES ou (*Manufacturing Execution System*) le système de gestion de la production et des ressources. Le système d'exécution des fabrications est une solution logicielle qui s'intercale entre le niveau du contrôle commande (occupé par les automatismes et la supervision) et le niveau de planification (ERP). Il assure l'exécution des fabrications et devient un outil essentiel pour la maîtrise et l'optimisation d'un système de production ;
- le SCM (*Supply Chain Management*) pour la gestion de la chaîne logistique, voire des entrepôts et des stocks ;
- le PGI (progiciel de gestion intégré), qui gère financièrement l'ensemble des activités de la société ;
- un ou plusieurs des systèmes suivants : PPM (gestion de projets et de portefeuille de projets), ordonnancement, gestion des temps, portails...

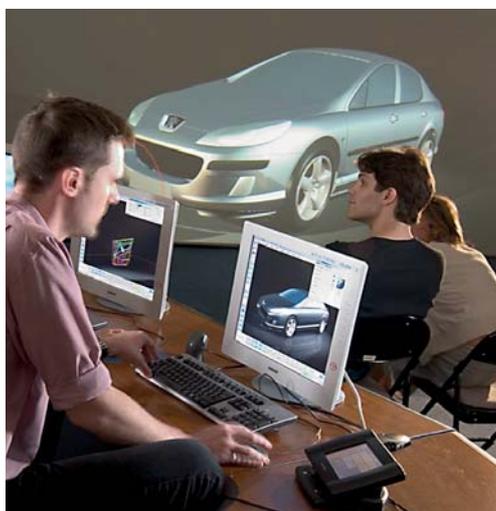
Le *progressive & intelligent manufacturing* a pour vocation d'intégrer tous ces silos, comme ce fut le cas avec les approches portail (IHM), BPM (*process*), EAI (logique applicative), ETL (données) dans l'informatique de gestion. Cette intégration, donnant une meilleure vision et de meilleurs moyens d'action sur la production, permet d'obtenir un système agile et flexible, voire proactif.

### Applications

Tous les secteurs de l'industrie, mais on peut mentionner en particulier des secteurs historiques tels que : la pharmacie, l'automobile... Les domaines privilégiés sont la mécanique, l'électronique et la construction: automobile, matériel de transport (aéronautique...) et l'électronique. Par extension, le PLM, dans le sens de gestion des données durant l'ensemble du cycle de vie, touche tous les secteurs et notamment les biens de consommation, les télécoms...

### Enjeux et impacts

Le PLM permet de réduire les temps de conception des produits afin de répondre à la volatilité actuelle de la demande et au souhait de dépersonnalisation du produit, à la réduction des coûts (une maquette virtuelle coûte



#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

moins cher qu'une maquette physique). Elle répond aussi aux problématiques organisationnelles actuelles de l'entreprise étendue en facilitant la conception en collaboration avec les sous-traitants.

Cela permet également de répondre aux exigences traditionnelles : performance-productivité (automobile...). Les avancées très fortes de la simulation numérique, ont été rendues possibles par la convergence de trois facteurs :

- des capacités de calcul intensif ;
- des logiciels et solveurs devenus capables de coopérer pour prendre en charge des problèmes multiphysiques et multiéchelles ;
- l'émergence en France de pôles de compétence capables de faire le lien entre les problèmes concrets des entreprises et les capacités logicielles et matérielles les plus avancées disponibles. Cette nouvelle offre concrète se développe autour de grands projets de pôles comme Teratec, EHPOC, CSDL, IOLS.

Par ailleurs, la maîtrise de la simulation numérique est un facteur de compétitivité très important car elle permet de développer en avance de phase des solutions de manière virtuelle. L'enjeu consiste à repousser sans cesse la limite technique et scientifique pour que le virtuel parvienne à représenter le réel de manière la plus exacte possible.

Un autre enjeu de taille est la très lente convergence sur des décennies des univers de la technique et de l'économie. Parmi les raisons qui expliquent cette observation nous pouvons citer :

- la lenteur de la mutation des organisations industrielles ;
- la complexification induite par la mondialisation en termes d'allocation de ressources industrielles ;
- le partage historique du marché entre les acteurs de la technique et de la gestion, qui ont eu chacun à subir de profondes mutations dans leur domaine informatique propre.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- Systematic, Minalogic, Aérospatiale Valley, LIESP, ENS Cachan, LNE
- Altran, Alten, Akka, Thales, SQLI, Steria, Courbon, Bodet...
- Dassault Systèmes, Lectra Systèmes, Missler Software, Courbon, Planisware, Ortems, Lascom, Spring

## Position de la France

La France est un des pays développés où l'industrie reste importante, certes moins qu'en Allemagne, mais plus qu'en Grande-Bretagne. La France est aussi positionnée dans des industries à forte valeur ajoutée comme l'aérospatial et la défense.

Concernant les technologies, la France est bien positionnée :

- plusieurs éditeurs de logiciel sur des domaines comme le MES, l'ordonnancement et le PLM ;
- une forte expérience et de nombreuses compétences dans les entreprises d'ingénierie ;
- la recherche dans le domaine est de bon niveau ;
- les compétences fortes en systèmes embarqués ;
- fusion croissante entre l'informatique et l'ingénierie.

## Analyse AFOM

### Avantages

Base industrielle Hi-Tech solide, Dassault Systems, de nombreuses compétences et société de services, des éditeurs logiciels et la maîtrise de certaines technologies clés (algorithmique, optimisation, intelligence artificielle...).

### Faiblesses

Mauvaise intégration de l'informatique sur les chaînes de production, coupure assez nette entre l'informatique de production et l'informatique de gestion.

### Opportunités

Il n'y a pas encore de champion(s) sur ce marché, les places sont à prendre, consolidation et écosystème autour de Dassault Systèmes, les SSII.

### Menaces

Arrivées prochaines d'IBM, Oracle et SAP sur ce segment, rachat d'entreprises nationales par des géants mondiaux.

## Recommandations

Développer la recherche publique autour de ces technologies.

Protéger les champions français du domaine, et leur permettre d'accéder plus facilement à la recherche publique.

Développer les formations sur ces technologies dès le niveau bac.

Créer des passerelles avec les technologies connexes : systèmes complexes, embarqué, robotique...

## Liens avec d'autres technologies clés

13

18

20

27

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



## 22. Optoélectronique

### Description

L'optoélectronique (ou photonique) se présente comme la rencontre de trois sciences, l'optique, l'informatique, l'électronique.

Les systèmes optoélectroniques sont des dispositifs qui permettent de générer, conduire, traiter et détecter la lumière. La nature, l'échelle et les longueurs d'ondes des systèmes considérés sont très variées allant jusqu'au TéraHertz et aux rayons X ou gamma.

Selon un travail de l'Agence française de l'optique photonique (AFOP), de la Société française d'optique (SFO) et les pôles d'optique, basé sur une consultation de 150 experts scientifiques et industriels, la photonique intervient dans six grands domaines rassemblant 21 technologies :

- télécoms : transmissions optiques courtes distances, fibres et composants, systèmes et réseaux ;
- santé et vivant : systèmes photoniques d'analyse pour la santé, systèmes d'imagerie médicale, capteurs photoniques pour le vivant, lasers pour la santé ;
- énergie, éclairage, affichage : LED et OLED, photovoltaïque, photonique et infrastructures de recherche, affichage et réalité augmentée ;
- *manufacturing* et contrôle : lasers et procédés industriels, techniques de fabrication de systèmes optiques, procédés industriels et mesures optiques ;
- surveillance, sécurité, spatial : systèmes d'imagerie complexes pour l'observation et la surveillance, capteurs d'images, sources capteurs et réseaux de capteurs ;
- matériaux et technologies génériques : nanophotonique et couches minces optiques, microélectronique et photonique, technologies et sources lasers, nouveaux matériaux et nouveaux composants.

### Applications

L'optoélectronique est une technologie applicable à de nombreux marchés. Elle est extrêmement répandue car elle couvre l'énergie et l'environnement, les sciences de la vie et la santé, la défense et la sécurité, les matériaux et la recherche.

Le marché mondial de l'industrie photonique a un fort potentiel de croissance avec 267 Md€ en 2008 et une estimation à 370 Md€ d'ici à 2020.

La croissance annuelle du marché de la photonique atteint 15 % en moyenne faisant de ce secteur l'un des plus dynamiques. La part de l'Europe est estimée à environ 43 Md€.

La France est, avec l'Allemagne et l'Angleterre, un acteur majeur de la R&D en photonique en Europe. Elle représente, en effet, environ un tiers de l'activité R&D dans ce domaine au niveau européen.

### Enjeux et impacts

La photonique permettra de développer de nouvelles technologies et de nouveaux produits durables.

L'industrie française de la photonique représente actuellement environ 50 000 emplois, auxquels il faut ajouter environ 150 000 emplois induits. Du point de vue économique, c'est aussi plus de 1000 entreprises réalisant 10 Md€ de chiffres d'affaires. La recherche française en optique photonique représente 200 laboratoires et 13 000 chercheurs. Son développement est susceptible de permettre la création de nombreux emplois à forte qualification.

L'activité industrielle française en photonique est répartie sur l'ensemble du tissu industriel, allant de quelques grands groupes, aux PME et start-ups. En comparaison avec l'Allemagne, le tissu français est comparable par sa taille, voire supérieur au niveau des grands groupes mais plus faible pour les PME et les entreprises de taille intermédiaires (ETI).

De plus, la photonique est reconnue par la commission européenne comme une des cinq technologies clés aux côtés des matériaux avancés, des nanotechnologies, de la micro-nanoélectronique et des biotechnologies.

Il s'agit donc de maintenir une excellence scientifique et technologique française, sur des marchés cibles et des marchés de prestige, comme l'astrophysique, le spatial, la défense, le nucléaire.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

• **R&D** : CEA et Leti, Cnes, CNRS, Foton, Femto-ST, IEF, IEMN, INL, Institut d'Optique Graduate School, Institut Fresnel, LAAS, Laboratoire Kastler Brossel, LCPIO, LPN, Observatoire de Paris - Meudon, Onera, CPMOH

• **Intégrateurs et utilisateurs** : Amplitude, Alcatel-Lucent, BFI Optilas, Dassault, Cilas, Cnes, Cognex France, Cristaux&Détecteurs, EADS, Essilor, I2S Vision, Imagine Optic, Kinoptik, Quantel, Lord Ingénierie, Optis, Peugeot, Renault, Sagem, Satimage, Saint Gobain Horiba Jobin Yvon, Seso, SOITec, ST Microelectronics, Teem Photonics, Tekcm, Thales, Ulis. Autres membres de l'afop, de la SFO et des pôles

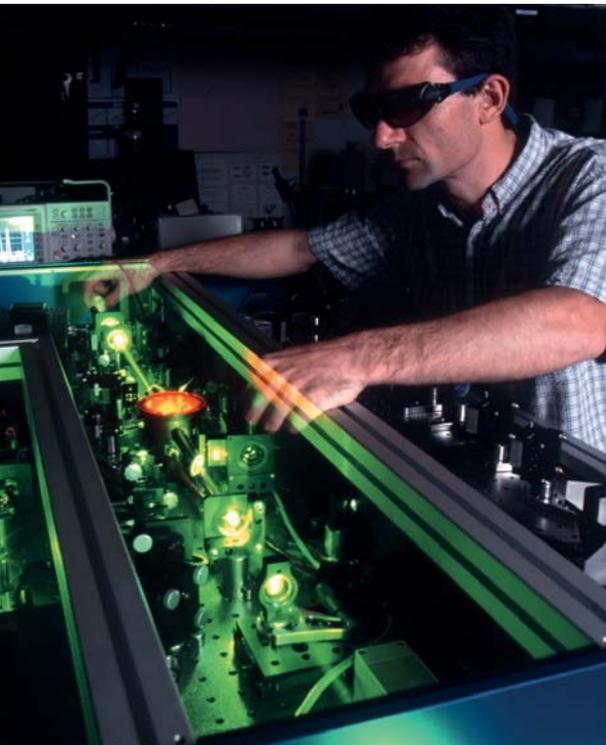
• **Centre de compétences** : AFOP, Anticipa, Elophys, la Société française d'optique, ALPhA-Route des lasers, Minatec, Minalogic, Optics Valley, Popsud-Optitec, Irepa Laser, Rhenaphotonics Alsace, Systèmes complexes d'optique et d'imagerie

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Position de la France

Au niveau européen la France se positionne en deuxième position derrière l'Allemagne. En effet, le nombre de PME et d'ETI y est plus fort qu'en France. Un écart qui pourrait s'accroître avec les problématiques liées à la transmission de ces entreprises en France.

Cependant, le territoire français dispose d'une grande force R&D et d'un tissu de PME très attractives, de qualités mondiales, certaines leaders sur leur marché. La spécificité française est sa capacité à innover et la très haute valeur ajoutée de ces produits. Par ailleurs, la France possède des savoir-faire et une recherche académique et industrielle de pointe.

## Analyse AFOM

### Atouts

Convention de partenariat entre Elopsys, Route des Lasers et Optitec qui va permettre d'engager des synergies sur les axes stratégiques, un fort potentiel académique et la participation à de grands projets européens (ITER, Extremely Large Telescope, Cérimed, ELI).

### Faiblesses

Filière industrielle fragile et des pôles manquant de moyens pour réaliser des applications plus larges (imagerie, éclairage, etc.) ; manque d'ETI bien positionnées en France et sur le marché mondial.

### Opportunités

De nombreux secteurs sont concernés (électronique, énergie, environnement, défense, santé et biomédical, transport, grands instruments scientifiques, équipement scientifique, équipement industriel, TIC, astronomie et spatial, aéronautique, etc.) et un secteur très dynamique bénéficiant d'une forte croissance (15 %).

### Menaces

Développement de technologies issues des programmes de recherche actuels des pays concurrents ; des savoir-faire présents en Asie et aux USA avec une concurrence euro-dollar (le chiffre d'affaires à l'export représente 50 % du chiffre d'affaires total de l'optique photonique française).

## Recommandations

Renforcer la complémentarité entre les systèmes et les composants optiques, dans une perspective d'industrialisation de la filière.

Investir sur des technologies émergentes et de croissance à fort débouché marché (photonique pour l'imagerie médicale, systèmes d'éclairages intelligents, matériaux optiques pour le photovoltaïque, vision artificielle). Renforcer le développement économique des pôles, en adressant des marchés applicatifs plus larges (imagerie médicale, éclairage LEDs et OLEDs, green photonics).

Il est nécessaire de favoriser l'émergence d'ETI bien positionnées capables de dynamiser les grands groupes et de tirer les PME vers des marchés mondiaux.

Afin de renforcer le lien entre industrie et milieu académique, il faut favoriser les collaborations entre industriels français et laboratoires. Cela peut être réalisé en associant l'expertise industrielle aux grands programmes de recherche nationaux.

De plus, le soutien à la R&D industrielle sur les technologies où le tissu de PME et d'ETI est particulièrement actif doit être accru. L'innovation dans ce secteur doit, en effet, être soutenue.

La France doit également influencer sur les orientations de la commission européenne en soutenant la participation des entreprises françaises dans les instances de réflexion et les appels à projets.

En outre, dans un contexte mondial, il est important d'accroître la présence française à l'international.

Tous les grands pays industrialisés ont aujourd'hui des programmes en cours concernant la recherche photonique excepté la France et cela devrait être corrigé.

### Liens avec d'autres technologies clés

14

15

#### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

#### Position de la France

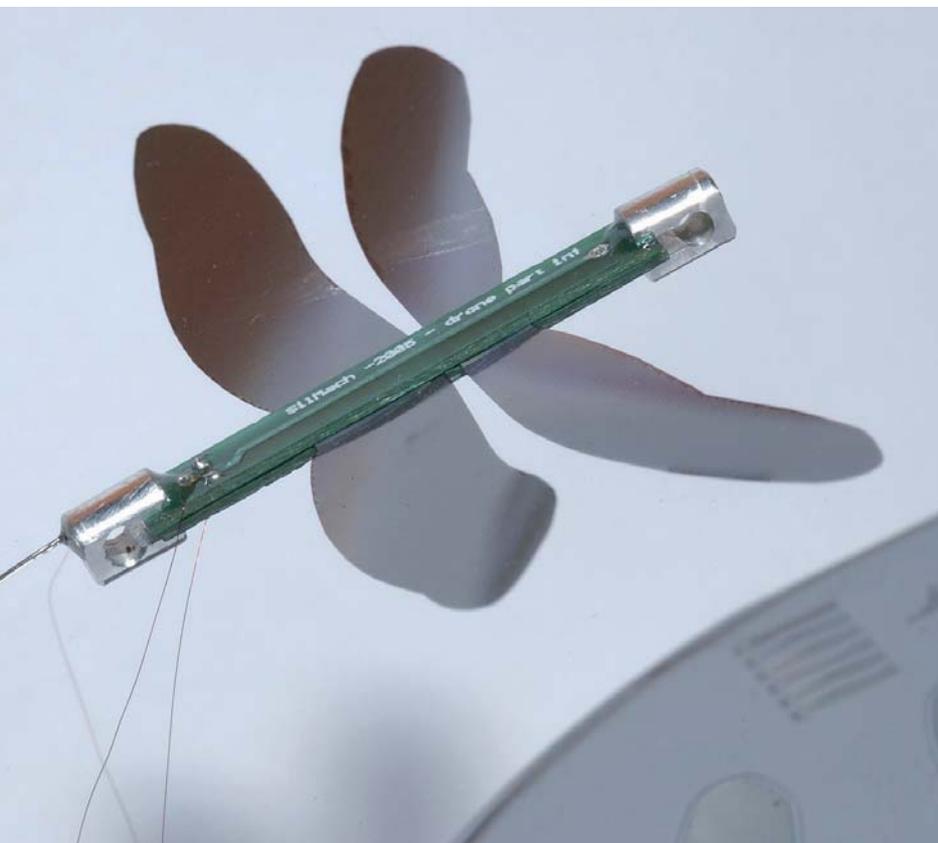
●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

#### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 23. Nanoélectronique



### Description

A l'approche des limites physiques, les nouveaux développements sont désormais classés en deux catégories : « More Moore » consiste à poursuivre le plus loin possible les progrès technologiques (*next génération CMOS*), « More than Moore » vise à tirer le meilleur parti des technologies existantes, en utilisant de nouveaux concepts architecturaux : *system on a chip* (SoC), *system in package* (SiP). On parle alors notamment d'intégration hétérogène, dont un procédé majeur consiste à empiler des puces identiques (mémoires), mais aussi de différentes natures tels que circuits numériques, circuits analogiques, circuits de puissance, capteurs, composants RF, diodes, etc. en utilisant de courtes interconnexions verticales. En ce qui concerne l'intraconnexion dans le silicium, la principale filière technologique est le TSV (*through-siliconvias*).

De tels développements imposent aux acteurs un effort permanent de R&D qui place l'industrie de la nanoélectronique parmi les industries consacrant le plus important pourcentage de leur chiffre d'affaires en R&D, avec une valeur située entre 18 % et 20 %.

Le mot nanoélectronique est aussi utilisé pour des recherches beaucoup plus avancées, qui concernent notamment

l'électronique moléculaire et l'usage de nanomatériaux (nanotubes de carbone), qui permettraient de passer outre les limites physiques de la technologie.

Les développements technologiques, mais aussi la taille des tranches de silicium, qui atteint maintenant 300 mm (avec des initiatives controversées pour développer des tranches de 450 mm) ont contribué à une croissance considérable du prix des usines de production (une ligne de production peut atteindre 4,5 Md€). Les technologies de production, l'obtention de rendements élevés sont des facteurs clés de succès technologique. Une recherche en cours est le développement des « minifab », permettant de produire à des coûts compétitifs des circuits en moindre volume.

La structure de l'industrie nanoélectronique a subi des modifications majeures. Face aux producteurs intégrés (IDM pour *Integrated Device Manufacturers*) qu'étaient les grands acteurs européens et américains, se sont développées les fonderies asiatiques, centrées sur le développement des techniques de production, mais aussi les sociétés « fabless ». Par ailleurs, l'ampleur des coûts de production et de R&D a amené de nombreux acteurs à développer des stratégies de mutualisation, d'externalisation des coûts et de concentration sur les produits les plus rentables.

Les acteurs des microsystèmes sont souvent les producteurs de semi-conducteurs, mais aussi des développeurs et intégrateurs de systèmes électroniques (Thales, e2v, Martec, Elvia, Eurofarad ou 3D-Plus, *spin off* de Thomson).

### Applications

Il est difficile de trouver un équipement professionnel ou grand public n'utilisant pas des circuits intégrés. La baisse considérable des coûts a contribué à cette diffusion (le prix d'une mémoire 1 Mo est passé de 75 000 € en 1973 à 0,03€ en 2005, et devrait passer à 0,01 € en 2017). C'est un marché dont la croissance mondiale n'a pas cessé, et dont les potentialités de croissance sont encore considérables. Elle est caractérisée par des cycles économiques très marqués, liés notamment aux évolutions anticipées des industries clientes. Selon les données du WSTS, le marché mondial des semi-conducteurs va atteindre 291 Md\$ en 2010, contre 226 en 2009 mais 270 en 2008. Les croissances prévues pour 2011 et 2012 sont respectivement de 5,6 % et 4,2 %.

Les industries utilisatrices ont lié des liens forts de coopération et de partenariat dans la R&D, voire dans la production. Ces liens permettent aux producteurs de semi-conducteurs de développer et de produire les produits les plus avancés pour les nouveaux marchés, et aux indus-

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

tries utilisatrices de disposer de produits performants et innovants par rapport à la concurrence. De ce fait, l'industrie microélectronique européenne est forte pour les circuits spécifiques visant notamment les domaines de l'automobile, des équipements industriels, des télécommunications ou des cartes à puce. Pour les produits de très grand volume, et notamment les mémoires, on a assisté à une très forte concentration, et une domination du marché par les acteurs asiatiques.

## Enjeux et impacts

Un enjeu direct est le maintien d'une activité française, ou au moins européenne dans ce secteur clé. De 2004 à 2010, la part du marché européen dans le marché mondial a baissé de 18 % à 13 %, et la part de la production en Europe a baissé de 12,5 % en 2004 à 9,6 % en 2009.

Les évolutions technologiques permettent non seulement d'introduire de nouvelles fonctions, mais aussi d'abaisser de 40 % le coût d'une fonction chaque année. La baisse permanente des coûts et l'augmentation continue des performances contribue à l'apparition de produits et applications innovants dans tous les secteurs.

Ces technologies permettent la miniaturisation des nombreux objets portables (téléphone mobile, mais aussi passeport électronique ou carte de santé).

La nanoélectronique contribue également aux gains de productivité et de compétitivité de l'ensemble des industries, mais aussi des services et des services publics. La baisse de la consommation énergétique des solutions s'appuyant sur les microsystèmes devrait aussi bénéficier à tous les secteurs.

Garder une présence et une compétence forte en microélectronique, avec une capacité tant de production que d'innovation est considéré comme une condition clé de la compétitivité pour les principaux pays industriels.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D publique** : CEA-Leti, Minatec, LAAS, LTM, IEMN, IEF, LPN, LIRMM, Tima, etc.
- **R&D privée** : STMicroelectronics, ST Ericsson, Soitec, Thales Micro, Altis, FREESCALE, Eurofarad, etc.
- **Pôle de compétitivité** : Minalogic, Catrene, Aeneas (Eniac), cluster Euripides du programme Eurêka, etc.
- **Instituts Carnot**, **Coordination Nationale de la Formation en Microélectronique et en nanotechnologies (GIP CNFM)**, etc.

## Position de la France

Présence d'un leader mondial STMicroelectronics, seul industriel européen dans les dix premiers mondiaux.

Existence d'un pôle majeur de R&D à Grenoble-Crolles. Présence d'un grand nombre de sociétés spécialisées notamment dans la conception de circuits et systèmes (Catrene a une centaine de membres en France).

En ce qui concerne l'activité microsystèmes, la France est le premier acteur du cluster européen qui lui est dédié, Euripides.

## Analyse AFOM

### Atouts

Présence de STMicroelectronics et d'utilisateurs industriels, acteurs mondiaux dans leur secteur ; niveau important de R&D publique et privée, présence d'une recherche et d'une industrie au niveau mondial.

### Faiblesses

Quasi absence en mémoires avec une concentration très forte des producteurs de microprocesseurs et la domination d'Intel.

### Opportunités

Systèmes embarqués ; recherche en nanoélectronique avancée.

### Menaces

Compétition très forte des acteurs mondiaux ; poids de la R&D et des investissements.

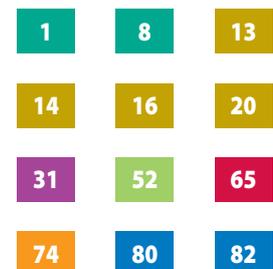
## Recommandations

Stimuler la demande pour de nouvelles applications.

Soutenir l'effort de R&D face à des besoins forts et croissants, et une concurrence mondiale, même si cet effort vise plusieurs domaines (*More Moore, More than Moore*, interconnexions et microsystèmes).

Encourager le développement de la production en France, ainsi que des outils, méthodes, équipements et matériaux nécessaires pour les nouveaux développements.

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 24. Technologies de numérisation de contenus

### Description

La numérisation de contenus est un procédé visant à construire une représentation discrète d'un objet du monde réel (pellicule vidéo, image, audio, caractères d'imprimerie, bâtiments, etc.) sous la forme d'un fichier informatique et donc numérique. Une conversion est ensuite possible dans différents formats numériques. Par ailleurs, le développement de la numérisation fait également appel à d'autres technologies telles que les techniques d'indexation pour classer ces contenus et faciliter leur accès.

La numérisation de contenus fait typiquement intervenir un scanner, des outils de reconnaissance optique de caractères (OCR), des technologies de quantification, d'échantillonnage et de compression, des éléments de stockage, etc. Par ailleurs, la numérisation de contenus bénéficie de nombreuses innovations tel le procédé de numérisation de livres fermés (sans avoir à les ouvrir), de documents imprimés ou manuscrits, reliés ou en liasses, sans avoir à les séparer, au moyen d'un système d'imagerie d'un objet en trois dimensions par ondes térahertz (1 THz = 1012 Hz).

Pour l'heure, la numérisation de contenus est en forte croissance car très jeune (phase de lancement) et concerne potentiellement des milliards d'œuvres artistiques (littéraires, musicales, cinématographiques, voire sculpturales), mais aussi environnementales (zones naturelles, sous-marines, villes numériques) ou autres (doubles numériques de personnalités, etc.). Elle adresse notamment des contenus anciens, de nombreux contenus étant désormais directement créés sous forme numérique, mais adresse également des objets voués à être réalisés sous forme physique. Dans le cas de contenus créés directement sous forme numérique, des conversions peuvent être nécessaires selon le réseau de distribution et/ou le terminal de lecture du contenu.

Les principaux leviers de croissance résident dans :

- l'essor d'Internet et l'explosion de la demande de la part des utilisateurs qui veulent consulter ces œuvres à distance, et à travers le monde ;
- l'accès à l'information plus rapide et parfois moins cher (baisse des coûts de distribution) ;
- la standardisation des supports numériques ;
- la compression avec la possibilité de stocker des centaines de titres musicaux, littéraires, etc. dans un tout petit objet ;
- le niveau de maturité des technologies utilisées (intérêt technique et économique) ;
- la numérisation des réseaux de diffusion (TV et Internet).

Néanmoins, il existe encore de nombreux points de blocage :

- les problèmes liés au respect du droit d'auteur et la question de la monétisation des contenus avec la possibilité de copier à l'infini sans altération du contenu ;
- l'industrialisation due à la fragilité du support (état ou niveau d'usure selon l'œuvre) reste faible avec un impact direct sur les coûts de numérisation ;
- la chaîne automatique de reconstruction 3D est particulièrement complexe ;
- pour certaines œuvres, la version numérisée n'égalera jamais la version originale, à cause de l'absence du contexte (les sculptures par exemple).
- le manque de techniques visant à garantir la conformité de la version numérisée par rapport à l'original (notamment pour l'architecture, l'urbanisme) ;
- l'application à grande échelle de la numérisation, dont les coûts sont parfois plus élevés que la valeur du contenu numérisé (contenu de niche).

### Applications

Cette technologie est utilisée essentiellement dans les industries suivantes à travers diverses applications :

- l'industrie de la culture, notamment dans le cadre de la numérisation d'œuvres artistiques, ainsi que pour l'accès à distance aux bibliothèques. Cela a un impact direct dans le secteur de l'éducation et la formation ;
- l'urbanisme et le tourisme avec la représentation 3D de monuments et de certains bâtiments. Le projet Terra Numerica, dont Thales est le chef de file, a notamment pour objectif le développement des technologies nécessaires à la production et à l'exploitation visuelle de représentations 3D de territoires urbains de grandes dimensions ;
- l'électronique grand public pour la consommation des contenus numérisés (livres électroniques, baladeurs numériques, ordinateurs, etc.).

Mais elle peut aussi être mise en œuvre dans toutes les industries et administrations disposant de fonds patrimoniaux importants (état civil, etc.).

L'objectif principal de ce type de technologie est de sauvegarder, diffuser et valoriser le patrimoine (notamment national) mais aussi tous les contenus au sens large. Elle permet aussi aux utilisateurs de stocker leurs contenus personnels.

L'intégration de la technologie dans les processus ne se fait pas de façon automatique. Elle requiert une généralisation de lecteurs compatibles (audio, vidéo, fichiers texte, etc.). Par ailleurs, la diffusion de cette technologie nécessite une standardisation qui n'est pas encore géné-

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

ralisée sur les œuvres littéraires (Amazon a par exemple un format propriétaire non interopérable). Ceci implique de convertir sous plusieurs formats les contenus numérisés, ce qui ralentit la diffusion de ce type de technologie et l'adoption par le grand public.

Dans le domaine du livre numérique, la numérisation concerne rapidement des volumes impressionnants. Par exemple, Gallica, la bibliothèque numérique de la Bibliothèque nationale de France (BNF), propose déjà plus d'un million de documents en ligne (livres, manuscrits, cartes, images, partitions, etc.). De même, en février 2010, Google Books comptait 12 millions d'ouvrages numérisés. Par ailleurs, en termes de coûts, la BNF estime que la numérisation d'un livre coûte entre 0,12 et 0,74 € par page, suivant la complexité de la page.

## Enjeux et impacts

La technologie répond aux enjeux sociétaux suivants :

- accès rapide aux contenus et à l'information, n'importe où dans le monde, permettant une meilleure diffusion de la connaissance, qui joue un rôle majeur dans les pays avancés qui poussent le développement d'une économie de la connaissance ;
- sauvegarde, diffusion et valorisation du patrimoine culturel dans un contexte de croissance forte du volume de contenus disponibles. Les versions numériques sont par ailleurs plus faciles à indexer, ce qui facilite la découverte de l'information et donc les usages.

Un enjeu important est la pérennité des support de données dans le temps.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D publique** : Ina (numérisation d'anciens documents audiovisuels), BNF, Inria, IGN, Armines, ENS Louis Lumière, Ircam, etc.
- **R&D privée** : Thales, Jouve, Diadeis, laboratoires Eclairs, Universciné (plateforme de vidéo à la demande de films indépendants, contribuant à numériser d'anciennes œuvres cinématographiques), etc.
- **Pôle de compétitivité** : Cap Digital, APIE, Polinum (plateforme collaborative de R&D pour la numérisation et la valorisation des fonds patrimoniaux) regroupant i2s, Arkhenom, Exalead, Amanager, le CEA-LIST, LaBRI et Isako, etc.

## Position de la France

La France est leader sur cette technologie avec les États-Unis.

Beaucoup d'acteurs français sont présents, en qualité de fournisseurs de technologie (conception, etc.) ou comme clients utilisateurs permettant une bonne diffusion.

## Analyse AFOM

### Atouts

Plusieurs acteurs impliqués et volontaristes (politiques et culturels) ; conscience nationale vis-à-vis de la préservation du patrimoine culturel.

### Faiblesses

Peu d'investissements privés en raison d'un coût très élevé et avec introduction de formats propriétaires ; débat autour des droits d'auteur.

### Opportunités

L'État consacre 750 M€ à la numérisation du patrimoine culturel dans le cadre des investissements d'avenir

### Menaces

Monétisation des œuvres une fois numérisées assez difficile ; piratage et falsification croissants.

## Recommandations

Promouvoir le traçage des contenus via des techniques de tatouage numérique visant à ajouter des informations de droit d'auteur, voire un identifiant unique dans le fichier numérisé, afin de mieux protéger les contenus.

Les systèmes de gestion collective des droits sont devenus d'une très grande complexité. Ils nécessitent des simplifications via de nouvelles solutions techniques facilitant le suivi des usages.

Harmonisation des formats de méta-données pour favoriser le développement d'applications.

## Liens avec d'autres technologies clés

17

28

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



## 25. Sécurité holistique

### Description

Les systèmes logiciels de sécurité visent à prévenir, détecter et limiter les attaques malveillantes de manière quasiment holistique à l'encontre des systèmes, des contenus, des services et des personnes. Ils se fondent en particulier sur la cryptologie et la sécurité au niveau de la donnée elle-même.

Ces systèmes doivent assurer l'intégrité, la confidentialité, la disponibilité et la traçabilité de la donnée et de ses traitements.

En effet, les SOA, le Cloud, le Web 2.0, etc. impliquent une imbrication de plus en plus forte. Ils rendent désormais nécessaire la mise en place d'une politique de sécurité au niveau de la donnée. Elle se base fortement sur la gestion d'identités, mais aussi sur la sémantique.

Cette approche complète la sécurité « traditionnelle », dite « périmétrique » : anti-virus, pare-feu, UTM, gestion des identités, SSO...

La sécurité doit aussi être déployée sur une multiplicité de terminaux avec des besoins et des failles de sécurité très différentes.

Ces technologies sont en cours de développement et encore peu déployées sauf dans des environnements très spécifiques et critiques, et sous forme de développements spécifiques.

### Applications

La sécurité holistique a des applications dans tous les secteurs et à tous les niveaux de l'entreprise. Cependant, certains secteurs sont très demandeurs : finance, administration, services informatiques, fabrication des composants électroniques, militaire, défense, aérospatial...

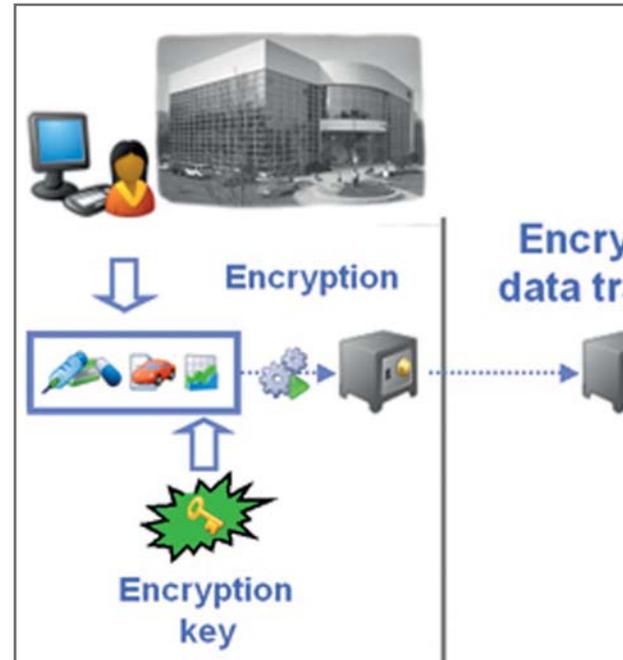
Le *Cloud Computing*, qui est en train de fortement impacter les systèmes d'information ne peut se concevoir sans des niveaux élevés de sécurité globale.

C'est tout aussi critique pour les entreprises qui basent leur modèle sur l'informatique : le commerce électronique bien sûr, mais aussi la banque, l'assurance, les télécoms...

Même des secteurs plus traditionnels comme l'automobile ont des besoins croissants de sécurité que ce soit pour la confidentialité de leur R&D ou pour la sécurisation de leur chaîne logistique.

### Enjeux et impacts

Premièrement, la sécurité est un marché dynamique et le marché de la sécurité progresse continuellement malgré la récession économique. Le rachat de McAfee par Intel ou d'ISS par IBM montre tout l'intérêt qu'il y a autour de ce marché où les marges sont très fortes (30 % de marge opérationnelle pour Symantec).



La Sécurité n'est plus vue comme un monde à part mais comme une composante essentielle et intrinsèque de tout système d'information.

Selon PAC, les revenus des éditeurs de solutions de sécurité atteindraient 11,3 M€ en 2010 au niveau mondial avec une croissance supérieure à 10 % en 2010 par an jusqu'en 2015.

Plus généralement, le marché mondial de la sécurité des systèmes d'information était estimé à 43 M€ en 2009 avec une croissance de 11 % par an.

La sécurité holistique est un catalyseur pour les autres technologies informatiques.

Elle est critique pour la confiance dans l'économie numérique et la protection de la vie privée.

L'informatique devenant de plus en plus importante dans l'activité des entreprises et dans la vie privée des Français, la sécurité informatique devient ainsi critique. Elle peut même être la source de défaillances d'entreprises.

La sécurité informatique est critique pour la souveraineté nationale : espionnage industriel et militaire, altération de services clés (énergie, réseaux, finance...), cyber terrorisme, cyber criminalité...

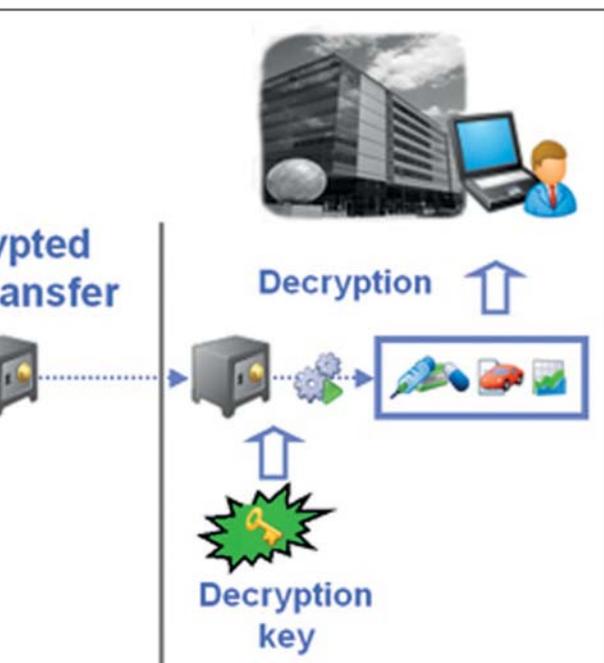
La sécurité est une discipline assez intensive en services associés. Les compétences en sécurité sont souvent très spécifiques ce qui en fait des populations assez à part.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CNRS Renater, Inria (Laboratoire de la haute sécurité Informatique à Nancy), INT-Artémis, Systematic (projets SIC, Mobisic), LRI (Paris 11/CNRS), Laboratoire d'informatique de l'École Polytechnique, LSE (Epita/Groupe Ionis), CEA List, GET/INT
- **Matériels** : Gemalto (via Gemplus), Oberthur, Trusted Logic
- **Industriels** : Thales (Cryptage), EADS (Sodern), Sagem, Alcatel-Lucent, Orange
- **Logiciels** : Arkoon, Netasq, Bull Evidian, Edenwall, Sinovia

## Position de la France

La France a précisé sa position en commençant à aligner ses moyens de sécurité autour des recommandations du « Livre blanc de la défense » qui définit les orientations pour se préparer aux attaques informatiques majeures. La France est championne incontestée des cartes à puces.

Parmi les champions pour les systèmes de sécurité critiques et complexes de par sa bonne maîtrise de l'algorithmique, en particulier dans le domaine militaire, la cryptologie et les PKI.

En revanche, la France est peu présente sur les outils les plus matures de sécurité « périmétrique » comme les anti-virus ou les pare-feu. Les champions sont les Américains et les Israéliens.

Plusieurs initiatives publiques ont été lancées comme le soutien aux pôles de compétitivité Images et réseaux, systématique, SCS (Solutions communicantes sécurisées), TES (Transactions électroniques sécurisées)...

## Analyse AFOM

### Atouts

Cryptologie, laboratoires, technologies militaires, fabricants de cartes à puce, prise de conscience gouvernementale.

### Faiblesses

Peu présent dans les marchés de masse et à l'international.

### Opportunités

De grands industriels (télécoms, aérospatial et défense) sont impliqués.

### Menaces

Arrivée des géants de l'informatique sur ce marché.

## Recommandations

- Encourager la recherche fondamentale en algorithmique, qui est la base de la sécurité.
- Mise en place de filières intégrées autour de la sécurité informatique, incluant le matériel, la cryptologie, le logiciel, les services...
- Sensibiliser le grand public et les entreprises au conséquences d'une sécurité informatique négligée.
- Exiger plus de sécurité des systèmes qui sont en dépeinement dans le « nuage ».
- Renforcer le pouvoirs de l'ANSSI, le BSI allemand étant un bon exemple.

## Liens avec d'autres technologies clés

26

28

29

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 26. Virtualisation et informatique en nuages

### Description

La virtualisation en soi n'est pas une technologie jeune mais la virtualisation sur architecture X86 l'est. La virtualisation est l'étape technique vers le concept de *cloudcomputing*.

Le « Cloud Computing » ou informatique en nuages, est un concept majeur de l'informatique, celui qui mobilise le plus d'investissements à l'heure actuelle.

C'est un environnement de stockage et d'exécution élastique de ressources informatiques impliquant plusieurs acteurs, connectés par Internet.

Cet environnement délivre un service mesurable, à la demande, à granularité variable et qui implique des niveaux de qualité de services. On passe progressivement pour certaines parties du système d'information à une informatique à la demande, mutualisée et automatisée. Cette optimisation de l'utilisation des machines permet aussi à l'informatique d'être plus verte. La technologie critique est le multi-tenant.

### Applications

Il y a trois principaux niveaux d'interactions de l'informatique en nuages :

- IaaS (*Infrastructure as a Service*), qui fournit de la capacité informatique pour le stockage ou pour obtenir plus de puissance de calcul ;
- PaaS (*Platform as a Service*), qui fournit une plateforme d'outils de conception, de développement et de test ;
- SaaS (*Software as a Service*), qui fournit des services applicatifs comme le CRM ou la messagerie.

Il y a aussi trois types d'informatique en nuages :

- Public : capacités mutualisées chez un opérateur tiers (Amazon, Google, Salesforce, OBS, Microsoft...);
- Privé : architecture en nuages réalisée en interne (e-Bay),
- Hybride : qui mixe public et privé.

Les applications de l'informatique en nuages « publique » concernent potentiellement tous les secteurs, pour leurs applications et infrastructures banalisées : CRM, RH, bureautique, stockage, développement et test. C'est particulièrement prometteur au niveau des PME.

Pour ce qui est de l'architecture en nuage privée, ce sont plutôt les moyennes et grandes entreprises qui vont la mettre en place, pour tous types d'applications. Par la suite, ces entreprises pourront aussi avoir recours aux offres publiques pour des besoins soit très généralistes comme la messagerie, soit pour des besoins très spécifiques comme du calcul intensif ou des besoins ponctuels de puissance informatique.

Les premières entreprises françaises à déployer ces technologies sont les opérateurs télécoms, à la fois pour leurs



besoins internes et pour fournir des applications, avec des tiers, au marché.

### Enjeux et impacts

C'est le marché le plus dynamique en France, en Europe et dans le monde : 780 M€ en France, 4 000 M€ en Europe en 2009 et un taux de croissance annuel moyen de 33 % jusqu'en 2015.

L'informatique en nuages va impacter l'ensemble de l'écosystème IT : constructeurs, éditeurs, prestataires de services, opérateurs télécoms...

En mutualisant et automatisant fortement certaines fonctions informatiques pour la plupart banalisées, l'informatique en nuages libère des budgets pour des projets plus porteurs de valeur ajoutée. Par ailleurs, par la flexibilité qu'elle induit, elle donne aussi beaucoup d'agilité au processus métiers des entreprises.

Comme pour le haut débit, l'infrastructure en nuages (le IaaS) devrait être considérée comme une infrastructure essentielle à la compétitivité de la France. En effet, si les entreprises et administrations françaises dépendent de fournisseurs étrangers, cela peut entraîner des problèmes de sécurité et de dépendance. Une plateforme

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

ouverte en logiciel libre serait très certainement un atout pour les entreprises françaises.

De plus, une telle infrastructure pourrait aussi résoudre la problématique du sous-équipement chronique des PME françaises en informatique.

L'informatique en nuages étant en partie une industrie lourde, nécessitant de lourds investissements en centres de données, elle va avoir besoin de mesures de soutien. Cette nouvelle architecture va permettre aux éditeurs logiciels d'étendre leur potentiel en se libérant des contraintes physiques, mais il va leur falloir redévelopper leurs logiciels et digérer le changement de mode de facturation (des problèmes de trésorerie sont à prévoir).

L'informatique en nuages est aussi la base des réseaux sociaux et des jeux sur Internet, deux segments très prometteurs.

Au niveau du service, la technologie est assez riche en services d'intégration de haut niveau, mais en automatisant des tâches simples, elle supprime aussi certaines activités riches en services.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : laboratoire MAS de Centrale Paris, Inria, CNRS, Irlisa, LRI, École normale supérieure de Lyon, Linria...
- **Logiciel libre** : projet OSCI d'OW2 en cours de déploiement chez France Télécom. C'est une plateforme logicielle complète libre
- **Opérateurs télécoms** : OBS, SFR
- **Éditeurs** : Dassault Systems, Cegid, Esker, Oodrive...
- **Spécialistes** : Systancia, CommomIT, Taleo, RunMyProcess, Faascape...
- **SSII** : Caggemini, Atos Origin, Linkbynet, ASPway...
- **Industriels** : Thales, Priceminister.com, Bull, Société Générale, La Poste...

## Position de la France

Sur le segment SaaS, la France a quelques acteurs spécialisés et des éditeurs traditionnels qui commencent à se positionner. Sur les autres segments de l'informatique en nuages, on retrouve les opérateurs télécoms. Les opérateurs télécoms européens devraient structurer une bonne partie du marché « Nuage » en Europe. Mais le marché est encore largement dominé par les américains tant au niveau de la technologie (VMware) que de la prestation de services : Amazon, Google Salesforce, Microsoft...

La France est une zone attractive pour installer un centre d'informatique en nuages : sa position géostratégique, son important marché accessible, la réglementation de la CNIL, de l'énergie peu chère, de bons réseaux télécoms...

La France héberge le projet en logiciel libre le plus abouti : OSCI d'OW2.

Vue à juste raison comme un segment crucial pour la souveraineté de la France, l'informatique en nuages fait l'objet de toutes les attentions. Le gouvernement français prévoit aussi d'allouer 780 M€ du « grand emprunt » pour le développement de l'informatique en nuage. Un appel à contribution pour Andromède a été lancé ; il s'agit de la principale plateforme nationale en nuages pour un budget estimé à 500 M€.

## Analyse AFOM

### Atouts

Pays le plus « intensif en logiciel libre », importante industrie des télécoms et du service informatique.

### Faiblesses

Un marché comparativement petit pour une industrie basée sur les volumes, pas d'acteurs d'envergure mondiale.

### Opportunités

Une plateforme en logiciel libre, des aides publiques pour l'infrastructure en nuages.

### Menaces

Lock-in d'acteurs nord-américains sur leurs technologies, asphyxie des acteurs français.

## Recommandations

Il faut considérer la partie infrastructure du *Cloud Computing*, l'IaaS (capacité de calcul et de stockage) comme une infrastructure critique, un enjeu de compétitivité et de souveraineté nationale à l'instar du haut débit.

Les administrations ne doivent pas dépendre de plateformes en nuages « étrangères », il faut donc une plateforme française de IaaS.

La régulation sur l'expatriation des données et sur la sécurité des plateformes devrait être renforcée.

Un canevas de développement (PaaS) *a minima*, doit être accessible aux entreprises françaises, afin d'éviter tout « emprisonnement » de leurs développements sur des plateformes non standardisées.

## Liens avec d'autres technologies clés

15

20

25

28

29

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 27. Logiciel embarqué et processeurs associés

### Description

Un logiciel embarqué est un logiciel permettant de faire fonctionner une machine équipée d'un ou plusieurs microprocesseurs, censés réaliser une tâche spécifique avec une intervention humaine limitée.

Les systèmes embarqués sont des systèmes combinant logiciel et matériel, fonctionnant de manière autonome mais pas isolée et délivrant des fonctions élaborées. Ces systèmes sont soumis à des règles de sûreté assez diverses mais généralement fortes.

L'enjeu des prochaines années sera d'effectuer la transition vers des microprocesseurs tenant compte des problèmes quantiques.

Ces dernières années ont été témoins de la diffusion des processeurs multi-cœurs. Leur utilisation s'étend aux *devices mobiles* (exemple netbooks), tirés par le développement des applications multimédias. Les processeurs multi-cœurs montent en complexité et, après des produits à architecture symétrique (cœurs identiques), commencent à apparaître les processeurs à architecture asymétrique (cœurs différents).

Au niveau logiciel, les applications existantes doivent être révisées afin d'exploiter la puissance de plusieurs processeurs. Le marché évolue également vers les systèmes intégrés (SoC : système complet sur puce avec un ou plusieurs microprocesseurs (MPSoC), de la mémoire, etc.) et vers les systèmes programmables (FPGA : reprogrammable après fabrication) et des systèmes spécifiques (ASIC, ASSP). Les nanotechnologies trouvent également ici toutes leurs applications (nanocomposant, miniaturisation).

Du microprocesseur au SoC, les problématiques restent la réduction de la taille des composants, l'amélioration des performances, la dissipation de la chaleur, la basse consommation, la réduction des courants de fuite, l'usage de nouveaux matériaux, etc. Ce segment englobe aussi les problématiques de conception des SoC complexes de conception intégrant les aspects matériels et logiciels. L'intégration de ces processeurs avec des logiciels embarqués est de plus en plus courante et reste une force de l'industrie française.

Cette capacité d'intégration est critique et exige par ailleurs des compétences de modélisation et d'architecture de systèmes très poussées, et nécessite donc beaucoup de services associés. Tout le cycle de vie du développement et de l'intégration du module embarqué est primordial, en particulier les tests qui permettent la certification selon les standards nationaux ou industriels.

### Applications

De nombreux secteurs, parmi les plus importants en France sont friands de ces technologies : high-tech, médical, automobile, aéronautique, spatial, défense, domotique...

Pour des raisons de performance et de coûts, les processeurs embarquent de plus en plus de logiciels. C'est évidemment le cas dans les systèmes embarqués comme l'avionique mais c'est aussi de plus en plus le cas dans des architectures d'informatique de gestion.

Ainsi, dans un an, les puces Intel vont embarquer les outils de sécurité de McAfee, pour faire face aux contraintes de l'informatique en nuages.



#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

Les SoC et microcontrôleurs se retrouvent à tous les niveaux, industrie comme produits finis de grandes consommations, et ils viennent apporter de la puissance et de l'agilité aux couches applicatives. Les problématiques soulevées par ces équipements rejoignent celles de l'embarqué : performances, coûts, taille...

## Enjeux et impacts

La France compte 220 000 emplois dans les systèmes et logiciels embarqués. L'embarqué représente 15 % du marché du logiciel et des services, soit près de 5 500 M€ en France en 2009.

Les systèmes embarqués trouvent leur place dans de nombreux véhicules, outils nomades, et dans les domaines de haute technologie : spatial, défense, nucléaire, militaire, vidéosurveillance... Ce sont des domaines d'excellence de l'industrie française.

Certaines de ces applications sont très porteuses : intelligence artificielle, objets communicants, transports intelligents, *progressive manufacturing*, robotique...

Enjeux de recherche technologique :

- les architectures multi-cœurs homogènes et hétérogènes ;
- la programmation des architectures massivement parallèles ;
- l'intégration de composants nano dans les systèmes ;
- les *Operating Systems* temps réel critiques ;
- la sûreté de fonctionnement des systèmes embarqués ;
- la fiabilité et la robustesse des systèmes dans leur environnement.

Les logiciels embarqués sont riches en services associés, car ce sont des systèmes généralement assez spécifiques.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Systematic, Aerospace Valley, Inria, CEA/List, CNRS-INPG-Verimag
- Altran, Alten, Esterel Technologies, Geensys, Capgemini/Sogeti, Assystem, Akka Technologies, Thales, EADS, Dassault Aviation, ST Microelectronics, Aonix
- Alcatel, Altera, Achronix, Atmel, BlueSilicon, Cypress, Latti
- **Acteurs des microprocesseurs** : Actel, Altera, Achronix, Atmel, BlueSilicon, Cypress, Lattice Semiconductor, Nallatech, QuickLogic, SiliconBlue, Tabula, M2000, Tier Logic, Xilinx

## Position de la France

La France est un des champions au niveau mondial avec les États-Unis (industrie militaire), l'Allemagne et le Japon (robotique).

Il y a une très forte utilisation dans les secteurs les plus importants de l'économie française : aéronautique, défense, automobile, télécoms.

Par contre, la France maîtrise peu les composants et les processeurs qui sont au cœur de ses systèmes.

## Analyse AFOM

### Atouts

Nombreuses compétences, forte expertise, de solides industriels, performances à l'exportation.

Maîtrise de certaines briques technologiques comme les processeurs standardisés.

### Faiblesses

Pas assez d'ouverture internationale de certains donneurs d'ordre.

### Opportunités

Mobilité, objets communicants, robotique, *progressive manufacturing*, sécurité globale, meilleure participation aux standards internationaux.

### Menaces

Déploiement de plus en plus important de technologies machines standardisées, difficulté de la certification de microsystèmes réalisés chez des fondeurs étrangers.

## Recommandations

Aider les spécialistes français du service à surmonter la crise qui a lourdement affecté leurs marchés.

Considérer les prestations de services comme partie intégrante du processus industriel.

Renforcer les filières de formation, les industriels prévoyant une pénurie de compétences à moyen terme.

Développer encore plus les partenariats public-privé à l'instar de certains pôles de compétitivité.

## Liens avec d'autres technologies clés

1

13

19

21

23

### Maturité (échelle TRL)

 Émergence (TRL : 1-4)
 Développement (TRL : 5-7)
 Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

 Leader ou Co-Leader
 Dans le peloton
 En retard

### Potentiel d'acteurs en France

 Faible
 Moyen
 Fort



## 28. Valorisation et intelligence des données



### Description

On regroupe sous cette dénomination la gestion et l'exploitation des données structurées et non structurées. Cela inclut les sous-segments suivant : les bases de données, les outils de *Business Intelligence* et les ETL, PIM et EII, le MDM et les outils ECM, BI, sémantique et moteurs de règles métiers. Indépendamment de leurs tailles ou de leurs secteurs, les sociétés considèrent à une quasi-unanimité, que leurs informations (données structurées et non structurées) sont un actif stratégique. Les éléments les plus souvent déployés sont les solutions d'intégration de données et de *Business Intelligence*. On trouve ensuite la qualité des données, et enfin, la gouvernance des données.

Parmi les premiers bénéfices attendus d'une gestion unifiée des informations, le référentiel unique se détache nettement. En effet, ce référentiel est très important pour améliorer l'efficacité de l'organisation et respecter les différentes réglementations nationales et sectorielles.

Les principales problématiques liées à la gestion unifiée des informations sont surtout de deux ordres : coûts et organisation. Les avantages métiers qu'apporte une gestion unifiée des informations sont avant tout l'amélioration et l'optimisation de la production, la gestion globale de la connaissance au sein de l'entreprise, la meilleure gestion financière de l'entreprise et des meilleures capacités en marketing et en ventes de l'entreprise.

### Applications

Tous les secteurs sont susceptibles d'implémenter des solutions de valorisation et d'intelligence des données. Les secteurs les plus friands sont les secteurs qui utilisent un grand nombre de données : les télécoms, la finance, la distribution, mais aussi la défense nationale...

Il y a trois étapes :

- l'utilisation de tous les types de données présentes dans l'entreprise ;
- l'utilisation des données externes à l'entreprise comme celles qui sont sur les réseaux sociaux ;
- la corrélation et l'analyse de ces données en vue de trouver des moyen d'action.

Ce sont ces technologies (moteur de web sémantique, moteur ontologique, moteur de règles) qui ont permis de réaliser le référentiel unique des données de l'A 380 d'Airbus.

Le moteur de recherche est en train de devenir l'outil décisionnel et de gestion de la connaissance des architectures Internet. Ainsi toutes les caisses du Crédit Agricole sont en train de basculer vers une architecture de poste client qui sera basée sur le moteur de recherche Sinequa.

À l'heure actuelle, les applications les plus en vue sont l'analyse prédictive (du comportement, de l'efficacité d'une chaîne logistique...), la sémantique, la CAO, le PLM et le marketing sur Internet.

Quelques éléments de cadrage :

- plus de 130 milliards de requêtes sont effectuées tous les mois sur Internet d'après comScore. En décembre 2009, plus de 22,7 milliards de requêtes ont été effectuées aux États-Unis, tandis qu'en France, près de 5,5 milliards de requêtes ont été effectuées ;
- en janvier 2010, Google détenait 89,2 % de part de marché en France selon AT Internet Institute. Aux États-Unis, la part de marché de Google s'élevait à 65,4 % en février 2010 selon comScore ;
- IBM y a investi 10 milliards USD, en R&D et en acquisitions : Cognos, SPSS, FileNet...
- Baidu, en Chine, a supplanté Google entre 2005 et 2010.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Enjeux et impacts

La donnée est la matière première de l'informatique. On s'est rendu compte, après avoir successivement optimisé la plupart des couches des systèmes d'information, que la prochaine « frontière » était la donnée. De plus, on a réalisé qu'on n'utilisait qu'une partie du potentiel des données auxquelles on avait accès.

Le principal enjeu de ces technologies, c'est l'optimisation de l'actif informationnel dans l'entreprise et au dehors, la clé de la société du savoir.

Cela se révèle particulièrement important dans un environnement où les départs à la retraite se multiplient et où se posent les problèmes de conservation du savoir et des connaissances.

Il s'agit d'un segment critique qui impacte toutes les autres technologies clés de l'informatique: SOA, Nuage, portails, collaboration, objets communicants...

Ce segment est aussi fortement lié à la sécurité, voire à l'intelligence artificielle et aux systèmes de systèmes.

Un des segments les plus en vogue est celui des bases de données réparties, notamment celles qui sont utilisées par les plateformes de web social et l'informatique en nuages : Hadoop/Cloudera (Apache), Cassandra (Apache), Terrastore... La plupart de ces solutions sont en logiciel libre.

Avec les bases de données SQL en logiciel libre, elles pourraient éventuellement ébranler l'oligopole américain sur les bases de données (Oracle, IBM, Microsoft).

Le foisonnement de jeunes pousses montre bien le dynamisme de ce segment en France.

C'est un marché très intensif en services, car ce sont des disciplines complexes, très proches des métiers et à très forte valeur ajoutée.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Inria, INT-Artemis, CNRS (LE2I et Toulouse Mirai), LLE (Bordeaux 3), Projet Quaero, IASI du LRI, Capdigital, Imaginove, Systematic, Paris 8 (Paragraphe), CEA List, Insa Rouen, INST, Labri, Limsi...
- **Industriels** : Dassault Systems (Exalead & blue Kiwi), Capgemini, Atos Origin, Stéria, Sopra, GFI, Devoteam, B&D...
- **Neteco**, Talend, Sinequa, Mondeca, Nuxeo, Exoplatform, Temis, Ever Team, Vinci Consulting, Jalios, Orchestra networks, Pertimm, Yacast, Safig etc...

## Position de la France

La France est mal positionnée sur ce domaine avec beaucoup d'acteurs mais de taille trop petite et souvent cantonnés au marché national. Les principaux acteurs sont : IBM, EMC, Oracle, SAP, etc. Les centres de recherche de BO subsistent en France.

La France a cependant d'excellentes capacités en sémantique, dans les moteurs de recherches et dans les moteurs de règles. Ces capacités en logiciel libre permettent l'accès à de nombreux projets innovants.

Certaines des jeunes pousses les plus en vue dans le domaine (Talend, Exoplatform...) sont des sociétés françaises issues du logiciel libre.

Plusieurs initiatives ont été prises :

- soutien des pôles Cap Digital et Imaginove ;
- projet Infom@gic ;
- appel à projets «services numériques culturels innovants» ;
- programme Quaero.

## Analyse AFOM

### Atouts

Sémantique, R&D, moteurs de recherches, moteurs de règles logiciel libre.

### Faiblesses

Taille des acteurs nationaux et un marché de la base de données qui est devenu oligopolistique.

### Opportunités

Logiciel libre, bases non SQL.

### Menaces

Les bases de données sont de plus en plus incluses dans des « packages » de solution. Les acteurs sur ce marché sont de plus en plus importants.

## Recommandations

Renforcer la recherche sur ce domaine et les passerelles vers les entreprises privées.

Aider les nombreuses PME du segment à passer à la vitesse supérieure, à s'internationaliser plus (aides directes, accord avec des Epic, participations du FSI...)

Renforcer la législation sur la sécurité des données.

## Liens avec d'autres technologies clés

24

25

28

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input checked="" type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 29. Portail, collaboration et communications unifiées

### Description

Portail, collaboration et communications unifiées sont des solutions qui permettent aux employés, aux partenaires et aux fournisseurs d'interagir et d'échanger entre eux, d'optimiser et de conserver leur savoir ; et cela tout en réduisant de manière significative la mise sur le marché, la complexité opérationnelle et, de manière générale, les coûts.

Le segment des portails et des outils de collaboration comprennent les navigateurs, la sémantique, la gestion de documents, les logiciels de *groupware*, les plateformes d'échanges et de collaboration, *workflow*, intranet et extranet, les portails, les moteurs de recherche et les plateformes Internet riches.

Les communications unifiées incluent des services de téléphonie IP (gestion des appels), la messagerie instantanée, la vidéoconférence, la gestion des calendriers, la gestion de la présence, *email*, *fax*, *voicemail*, la téléprésence, ainsi que des applications de communications sur mesure.

Le développement des communications IP (intégrant la voix et la data) a permis de proposer des services convergents. Les solutions avancées de communications unifiées, telles que la VoIP ou la messagerie unifiée, permettent aux PME de rester compétitives et réactives face aux grandes sociétés tout en améliorant leur image professionnelle.

Ces technologies permettent de relier l'informatique à ses utilisateurs, mais surtout d'optimiser cette relation. C'est le pendant logiciel de l'IHM.

Ce segment est très dynamique car le partage de l'information et la gestion des connaissances deviennent cruciaux au sein des sociétés privées.

### Applications

Tous les secteurs sont susceptibles d'implémenter des solutions de collaboration, de portail et de communications unifiées.

Le marché se segmente en deux parties : les solutions à forte valeur ajoutée et les solutions banalisées.

Les principales applications à forte valeur ajoutée sont :

- la relation avec les clients, que ce soit dans les centres d'appels ou en agence, où l'acteur doit avoir à sa disposition le maximum d'informations de la manière la plus économique possible ;
- ingénierie et R&D, un des secteurs les plus demandeurs de ces outils de productivité, en particulier à l'heure actuelle où l'innovation est de plus en plus collaborative ;
- la finance de marché.

Les applications banalisées vont, quant à elles, se répan-

dre sur l'ensemble du marché où elles vont remplacer, compléter et unifier les anciennes approches.

À moyen terme, l'accès à l'informatique se fera dans sa majorité à partir de portails collaboratifs, en particulier avec l'avènement de l'informatique en nuages. On peut ainsi faire abstraction du matériel, du poste client et bénéficier d'une intégration légère mais performante de son informatique.

### Enjeux et impacts

Le marché est évalué à près de 2,4 milliards de dollars pour 2010, avec un fort potentiel de croissance au niveau mondial (CAGR 2009-2011: + 23,7 %).

C'est un segment stratégique pour la plupart des acteurs de l'informatique car c'est celui où ils sont en contact direct avec les utilisateurs.

Ce marché est fortement lié à l'IHM, aux objets communicants, à l'informatique en nuages, à la sécurité et à la valorisation et l'intelligence des données.

Le segment restera très dynamique car le partage de l'information et la gestion des connaissances sont cruciaux au sein de nos sociétés. C'est particulièrement le cas pour des pays vieillissants à fort contenu intellectuel comme la France.

La partie à forte valeur ajoutée est cruciale pour la hausse de la productivité et de l'efficacité au sein des sociétés concernées même si l'impact organisationnel n'est pas à négliger. Cela va aussi permettre de faire face à la pénurie de certaines compétences, pénurie imputable en partie aux changements démographiques qui commencent à affecter la France.

Cela est d'autant plus vrai pour des entreprises ayant une activité internationale, une forte R&D et qui doivent maintenir une force de travail mobile.

Du fait de sa position quasi monopolistique sur les PC, c'est un marché dominé par Microsoft, mais essentiellement sur les approches traditionnelles et à faible valeur ajoutée du poste de travail. À noter que le PC va être bien moins hégémonique dans un futur proche, perdant des parts de marché face aux nouveaux outils mobiles comme les tablettes et les téléphones intelligents. Ces terminaux sont plus friands d'accès de type portails collaboratifs que les PC.

Le SaaS a également un impact non négligeable sur ce secteur avec des acteurs comme Google qui cherchent à grandir sur ce segment, offrant des suites collaboratives à bas prix. Microsoft connaît par ailleurs un très fort succès en France avec ses offres de messagerie et de bureautique en SaaS.

Le logiciel libre a lui aussi banalisé l'accès à ces logiciels, d'autant plus que les outils pour internet et le Nuage sont

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



## Position de la France

On retrouve sur le segment des éditeurs (Microsoft, Teleware, Adobe, Citrix, SAP, Oracle), des vendeurs de matériels (Alcatel-Lucent, Avaya, Cisco, Nortel, Siemens etc.) et des opérateurs télécoms (BT, Verizon, OBS, Comcast etc.). En France, Orange et Alcatel-Lucent font partie du peloton de tête, avec une année 2009 difficile pour Alcatel-Lucent.

Les leaders sur ce marché sont américains avec IBM, Microsoft et Google. La France est compétitive sur des sous-segments tels que les moteurs de recherche.

Il existe peu de projets de ce type dans la recherche publique.

La France, pour rester dans la course, devra miser en bonne partie sur le logiciel libre.

## Liens avec d'autres technologies clés

25

26

28

## Analyse AFOM

### Atouts

Pays le plus intensif en logiciel libre, industrie des télécoms.

### Faiblesses

Pas d'acteurs logiciels de poids, faible implication de la recherche publique.

### Opportunités

Marché des terminaux mobiles, plateformes en logiciel libre, informatique dans les nuages.

### Menaces

Puissance et présence des grands acteurs américains du marché, non standardisation du poste client.

très souvent bâtis avec des technologies libres. De plus en plus d'entreprises font le choix de ces technologies.

En conséquence, sur la partie banalisée du marché, la compétition s'est renforcée et les prix sont en baisse. Cela permet d'allouer les budgets à des fonctions plus créatrices de valeur.

C'est un marché reposant assez fortement sur le service informatique.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Industriels** : Systematic, CapDigital, Alcatel-Lucent, Orange Business Services, Dassault Systèmes (Exalead, Blue Kiwi), Sinequa, Nuxeo, Exoplatform, Ever Team, Jalios, Vdoc etc...
- Capgemini, Atos Origin, Sopra Group, Stéria, SQLI, etc.

## Recommandations

Aider les communautés libres qui créent de la valeur en France.

Développer les formations : logiciel libre, couplage téléphonie informatique.

Renforcer la législation sur les standards ouverts, la localisation et la sécurité des données.

Renforcer l'implication de la recherche publique sur ces technologies qui sont plus des technologies de développement que de recherche pure.

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort

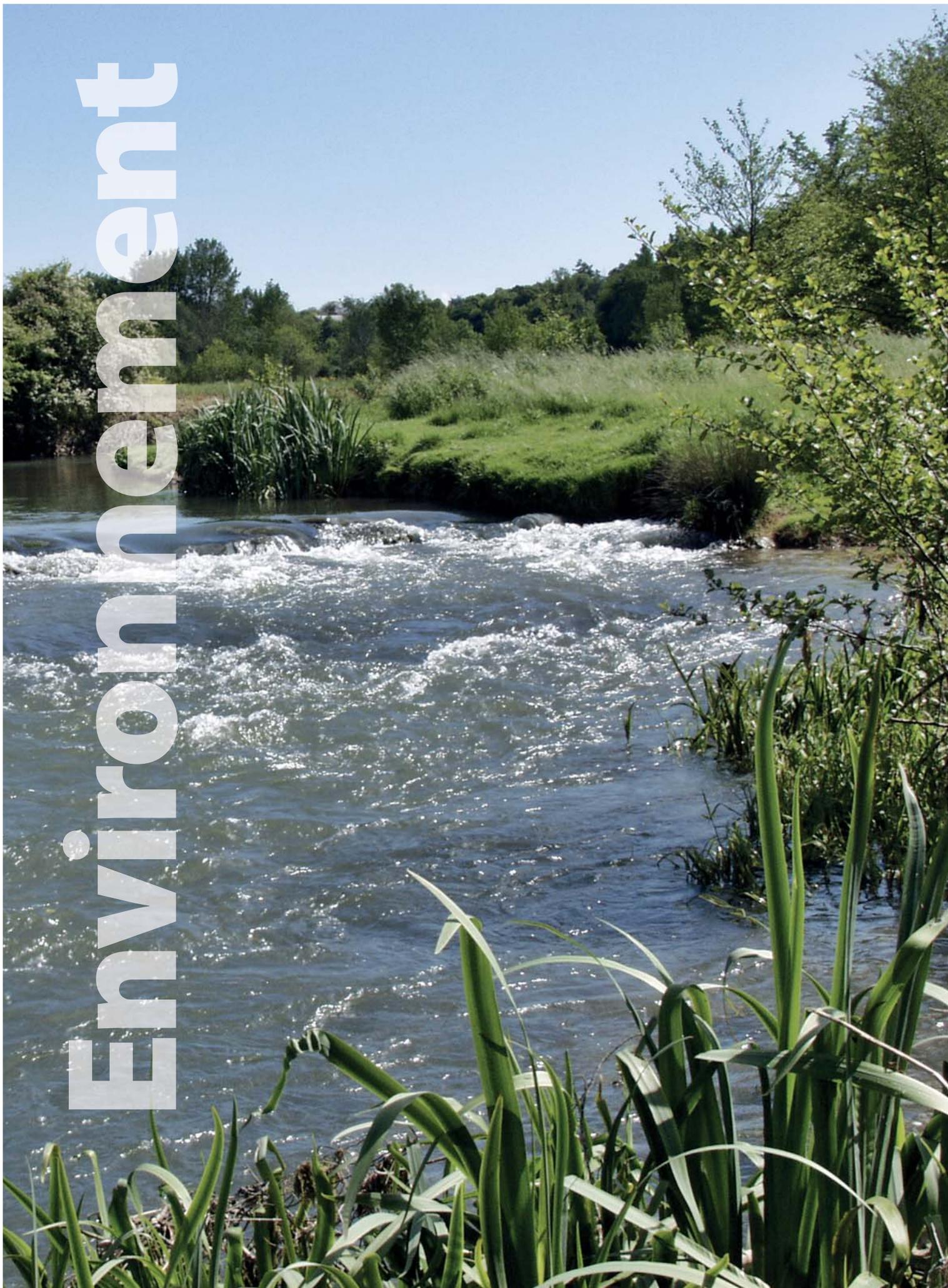


## BIBLIOGRAPHIE

- Premières assises françaises du logiciel embarqué : *Cartographie du secteur des fournisseurs de logiciels et services dans le domaine des systèmes embarqués*, 2007. [www.telecom.gouv.fr](http://www.telecom.gouv.fr)
- Enterprise 2.0 Conference : *Enterprise 2.0: What, Why and How*, 2009. [www.e2conf.com](http://www.e2conf.com)
- OPIEC : *Étude sur le marché et les compétences autour des logiciels embarqués*, 2008. [www.fafiec.fr](http://www.fafiec.fr)
- OCDE : *OECD 2009 - Innovation in the software sector*, 2009. [www.oecd.org](http://www.oecd.org)
- DGA : *Plan stratégique de recherche et technologie de défense et de sécurité*, 2009. [www.ixarm.com](http://www.ixarm.com)
- JRC-IPTS : *The Impact of Social Computing on the EU Information Society and Economy*, 2009. <http://ipts.jrc.ec.europa.eu>
- CE RFID : *A Roadmap for RFID, Applications and Technologies*, 2008. [www.rfid-in-action.eu](http://www.rfid-in-action.eu)
- Celtic : *The Celtic Purple Book*, 2010. [www.celtic-initiative.org](http://www.celtic-initiative.org)
- Cultural Human Resources Council : *Digital Media Content Creation - Technology Roadmap*, 2009. [www.culturalhrc.ca](http://www.culturalhrc.ca)
- DGA : *Plan stratégique de recherche et technologie de défense et de sécurité*, 2009
- European Internet Foundation : *The Digital World in 2025 - Indicators for European Action*, 2009. [www.eifonline.org](http://www.eifonline.org)
- EIFFEL think tank : *EIFFEL Report - Future Internet*, 2009. [www.future-internet.eu](http://www.future-internet.eu)
- EITO : *European Information Technology Observatory*, 2010. [www.eito.org](http://www.eito.org)
- European Commission : *Future Networks & Services*, 2008. <http://cordis.europa.eu>
- European Commission: *The Future of Software and Software Based Services*, 2010. <http://cordis.europa.eu>
- European Commission: *White Paper on Cloud Computing*, 2010. <http://cordis.europa.eu>
- European Commission : *Future Internet 2020*, 2009. [www.future-internet.eu](http://www.future-internet.eu)
- Pew Research Center : *The Future of the Internet*, 2010. [www.pewinternet.org](http://www.pewinternet.org)
- Fing, Isoc France et Silicon Sentier : *Internet du futur : vers un « cahier des charges »*, 2009. <http://internetdufutur.wordpress.com/>
- IBM : *CEO Study*, 2010. [www.ibm.com/services/us/ceo/ceostudy2010/](http://www.ibm.com/services/us/ceo/ceostudy2010/)
- IBM : *CIO Study*, 2010. [www.ibm.com/services/us/cio/ciostudy/](http://www.ibm.com/services/us/cio/ciostudy/)
- Inria : *Plan stratégique 2008-2012*, 2008
- ITEA 2 : *ITEA Roadmap for Software-Intensive Systems and Services*, 2009. [www.itea2.org](http://www.itea2.org)
- ITU : *The Future Internet*, 2009. [www.itu.int](http://www.itu.int)
- European Commission : *Networked Media Current Research, Results and Future Trends*, 2009. <http://cordis.europa.eu>
- European Commission : *Research on Future Media Internet*, 2009. <http://cordis.europa.eu>
- Deloitte : *Telecoms predictions 2010*, 2010. [www.deloitte.com](http://www.deloitte.com)
- Media Delivery Platforms Cluster : *Multimedia Delivery in the Future Internet*, 2008. <http://cordis.europa.eu>
- Deloitte : *Telecommunications Predictions - TMT Trends 2009*, 2009. [www.deloitte.com](http://www.deloitte.com)
- Deloitte : *Technology Predictions - TMT Trends 2009*, 2009. [www.deloitte.com](http://www.deloitte.com)
- Deloitte : *Media Predictions - TMT Trends 2009*, 2009. [www.deloitte.com](http://www.deloitte.com)
- JRC-IPTS : *The 2010 report on R&D in ICT in the European Union*, 2010. <http://ipts.jrc.ec.europa.eu>
- Europeana Group : *Highlights of Europeana v1.0*, 2010. <http://version1.europeana.eu>
- IDATE, *DigiWorld Yearbook 2010*, IDATE, 2010.
- PAC, *CIO Board*, 2010
- PAC, *SITSI 2010*. [www.sitsi.com](http://www.sitsi.com)
- Pujol M., *Open Source state of the art*, PAC, 2008. [www.pac-online.com](http://www.pac-online.com)
- Ménard E., *L'entreprise étendue, évolution et enjeux métiers*, PAC
- Pujol M., *Le Cloud Computing en France*, PAC 2010.
- Ropert S., *M2M - The Machine-to-Machine Markets, 2009-2013*, IDATE, 2009.
- Bonneau V., *RFID & Internet of Things*, IDATE, 2009.
- Michaud L., *Le marché mondial des jeux vidéo*, IDATE, 2009.
- Sauquet T., *Web 3D, du monde virtuel au web immersif*, IDATE, 2009.
- Michaud L., *Serious game*, IDATE, 2010.
- Montagne R., *FTTx : Stratégies des opérateurs leaders*, IDATE, 2010.
- Montagne R., *FTTx Watch Service*, IDATE, 2010.
- Pujol F., *LTE Watch Service*, IDATE, 2010.
- Pujol F., *Is LTE taking-off? Business models and roadmaps 2010*, IDATE, 2010.
- Carbonne P., *The Future of Mobile Communications*, IDATE, 2009.

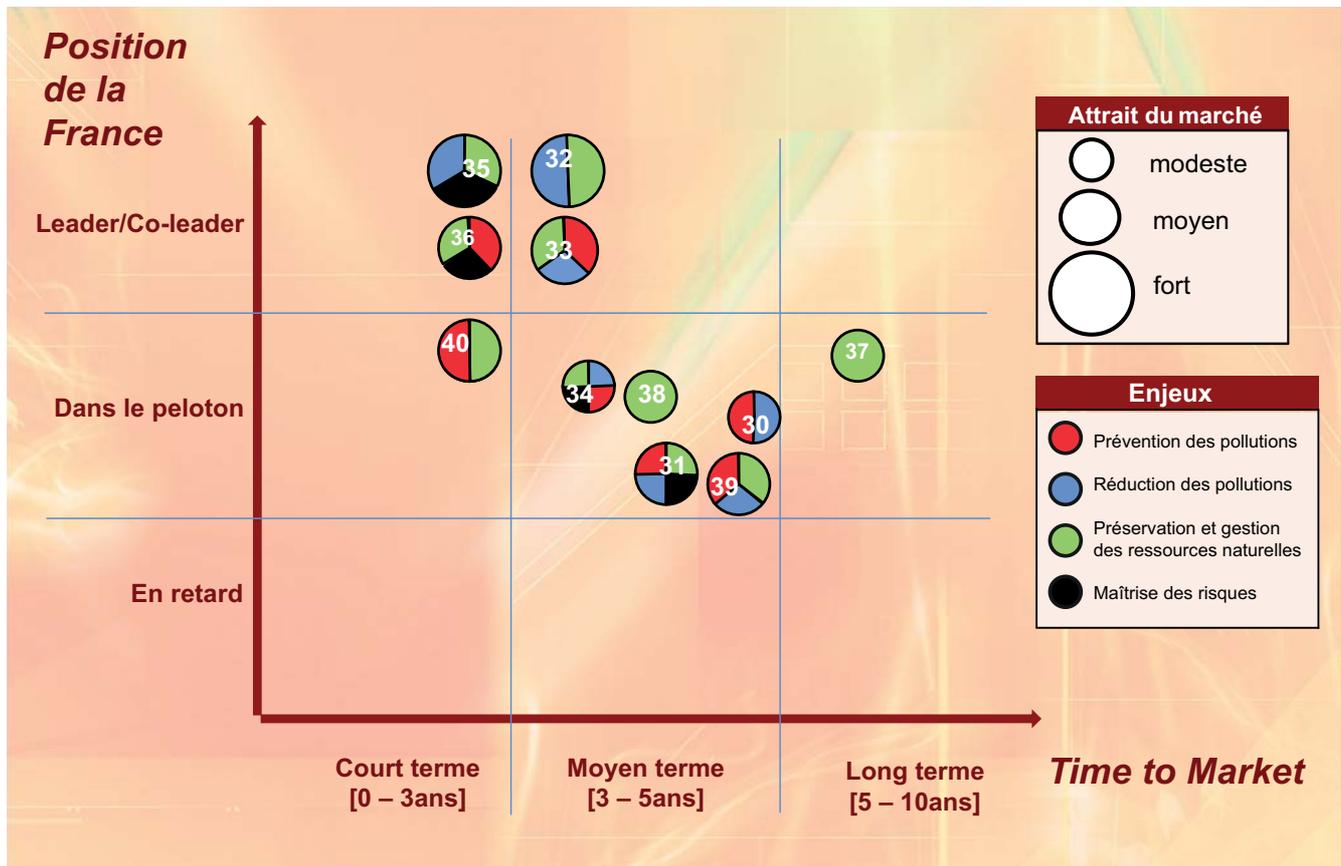


# Environnement



# Environnement

- 30. Technologies pour la captation maîtrisée et le traitement des sédiments pollués
- 31. Capteurs pour l'acquisition de données
- 32. Technologies pour le dessalement de l'eau à faible charge énergétique
- 33. Technologies pour le traitement des polluants émergents de l'eau
- 34. Technologies pour le traitement de l'air
- 35. Technologies pour la dépollution *in situ* des sols et des sites pollués
- 36. Technologies pour la gestion des ressources en eau
- 37. Technologies pour le recyclage des matériaux rares et leur valorisation
- 38. Technologies de tri automatique des déchets
- 39. Valorisation matière des déchets organiques
- 40. Éco-conception

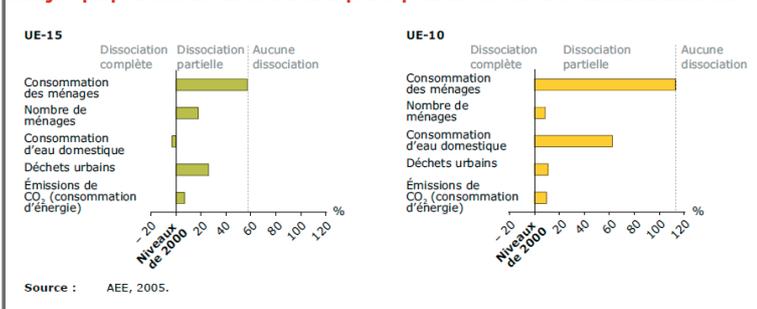


## Contexte et enjeux

Vitesse et ampleur du développement économique, évolution démographique sont autant de menaces sur les écosystèmes et l'intégrité de leurs services écologiques. Il est communément admis aujourd'hui l'existence d'une limite physique à la poursuite de la croissance économique basée sur l'utilisation des ressources.

Nos modes de vie à dominante urbaine, la démographie sont autant de facteurs qui à l'échelle européenne pèsent sur l'environnement de manière toujours plus intense : réchauffement climatique, pollution de l'air, pollution de l'eau, perte de la biodiversité, prélèvement des ressources naturelles... Ainsi, par exemple, l'EEA ne prévoit pas, à l'horizon 2020 de dissociation entre la consommation des ménages et son impact sur les ressources environnementales.

Ménages – perspectives de dissociation d'ici à 2020 pour les pressions et les ressources environnementales des 10



Dès lors, l'accès à la ressource et à son exploitation sur le long terme sont des enjeux majeurs : cela concerne autant l'eau que les ressources minérales, ainsi que l'impact de leur utilisation sur l'environnement (émission de polluants, production de déchets) et sur la population.

Sous l'impulsion donnée par la réglementation, qui joue un rôle moteur dans ce domaine, des progrès ont déjà été faits ces dernières années : diminution sensible des émissions de substances appauvrissant la couche d'ozone, réduction des émissions atmosphériques entraînant l'acidification et la pollution atmosphérique, accroissement du traitement des eaux usées urbaines et du recyclage de nos déchets...

Toutefois, la situation reste complexe et beaucoup de défis restent à relever pour faire face à d'autres pressions environnementales qui demeurent importantes : production de déchets restant élevée, émissions de GES, effets négatifs de la qualité de l'air sur la santé humaine, décharges de nutriments par les populations rurales et l'agriculture comme source de pollution de l'eau...

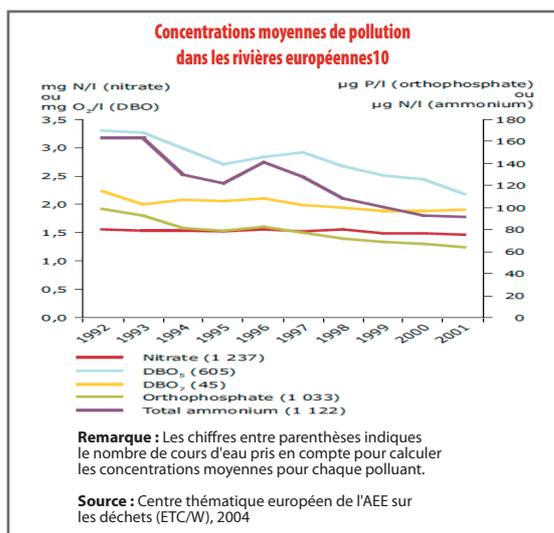
## Eau

Les enjeux liés à la gestion de la ressource en eau sont de deux types, qualitatifs d'une part, quantitatifs d'autre part. Globalement la qualité de l'eau en France et en Europe enregistre une amélioration, notamment sous l'impulsion des différentes directives qui ont été instaurées au cours des dernières années.

Récapitulatif des directives européennes sur l'eau

Directives	Description
Directive traitement des eaux résiduaires urbaines (1991)	Normes sur les équipements de collecte et de traitement des eaux
Directive eau potable (1998)	Norme de qualité minimale à respecter pour les eaux destinées à la consommation humaine
Directive cadre sur l'eau (2000)	Atteinte d'un bon état écologique des eaux et des milieux aquatiques en 2015

Toutefois, la pollution diffuse (à l'opposée d'accidentelle) de l'eau par des polluants dits émergents est de plus en plus préoccupante. Ces polluants dits « émergents » sont très variés et mal connus : substances pharmaceutiques (antibiotiques...), produits de soins corporels, détergents provenant de rejets industriels et/ou urbains, perturbateurs endocriniens, retardateurs de flamme... En plus des composés parents, on trouve également de nombreux composés issus des transformations biotiques et abiotiques de ces molécules mères.



La qualité des eaux marines s'est également améliorée à cause de la généralisation du traitement des rejets des eaux usées et de la diminution des pollutions accidentelles et illicites. Cependant les polluants émergents émis par les stations d'épuration sont aussi préoccupants.

Une directive récente, la directive-cadre sur la stratégie du milieu marin (2008) complète la directive sur l'eau et vise l'atteinte du bon état écologique du milieu pour 2020.

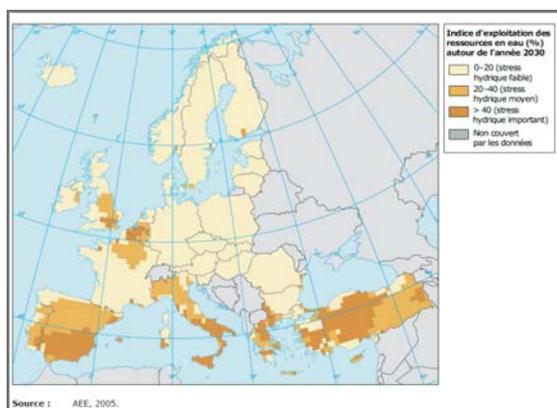
D'un point de vue quantitatif, deux points sont à considérer : d'abord une répartition inégale de l'eau disponible sur terre et ensuite un effet probable du changement climatique, qui induit de changements substantiels au niveau des régimes des précipitations entraînant un stress hydrique important.

La majorité de l'eau sur terre est de l'eau de mer, la quantité globale d'eau douce ne représentant que 2,53 % du total. Le volume global d'eau douce utilisable s'élève à 12 500 milliards de m<sup>3</sup> : ce volume serait suffisant s'il était équitablement réparti, ce qui n'est pas le cas.

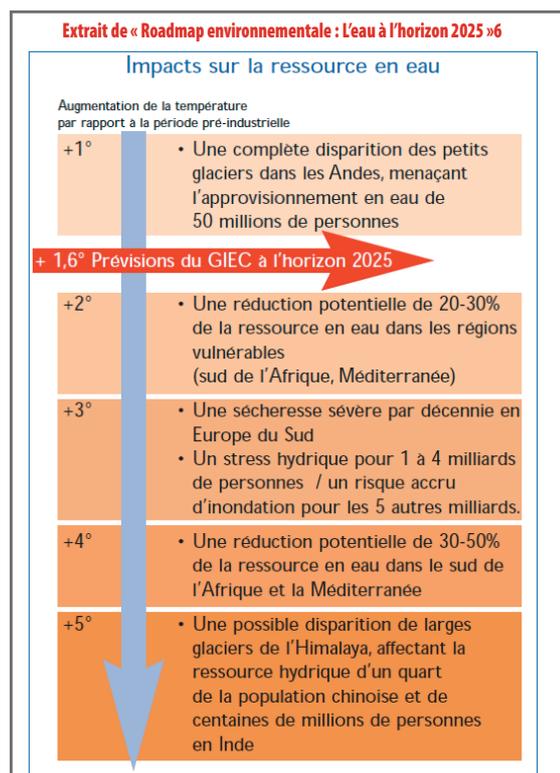
**Disponibilité en eau et population par grandes zones géographiques (source : UNESCO/PHI)**

Zones	Disponibilité en eau	Population
Amérique du Nord et centrale	15 %	8 %
Amérique du Sud	26 %	6 %
Europe	8 %	13 %
Afrique	11 %	13 %
Asie	36 %	60 %
Australie et Océanie	4 %	< 1 %

Phénomènes climatiques extrêmes, inondations, tempêtes, globalement, le nord de l'Europe sera plus sujet aux inondations et le sud, aux sécheresses.

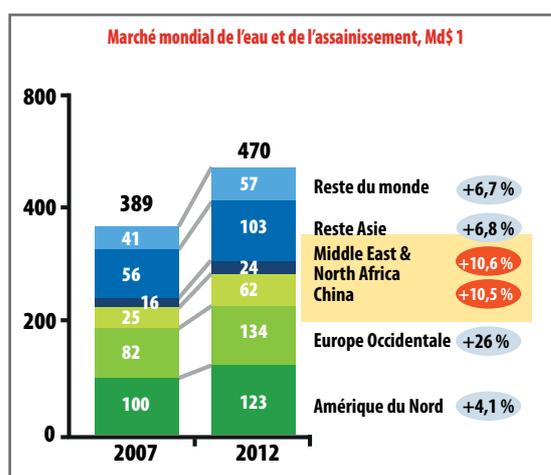


L'Espagne, par exemple, se prépare déjà à de futures pénuries par le biais de programmes visant l'établissement d'un vaste réseau de dessalement dans le pays et la promotion de systèmes d'irrigation plus efficaces.



Le marché de l'eau qui regroupe les activités liées à l'eau potable (captage, transport, traitement, affinage...), aux eaux usées ainsi qu'aux eaux pluviales est globalement mature en Europe (faible croissance liée aux investissements nécessaires pour répondre aux exigences réglementaires). Il atteint un chiffre d'affaires de plus de 15 Md€ en France et représente plus de 112 000 emplois [3]. Près d'un milliard de personnes sont desservies dans le monde en eau et assainissement par le secteur privé, près d'un quart de cette population est servie par Veolia Environnement ou Suez Environnement, les deux acteurs majeurs à l'échelle mondiale, français.

De fait, la croissance se situe à l'international : demande croissante, liée à la croissance démographique, au développement économique des pays émergents, et à l'urbanisation associée.



## Air

La pollution atmosphérique a fait l'objet d'une attention particulière à l'échelle européenne sur la dernière décennie : des réglementations qui concernent aussi bien les sources fixes, et notamment les installations industrielles, que les sources mobiles comme les transports ont été mises en place. Suite au programme européen CAFE « air pur pour l'Europe », la stratégie pour la pollution atmosphérique a été publiée en 2005 : elle ambitionne de diminuer la pollution atmosphérique et d'atteindre un niveau de qualité de l'air n'ayant aucune incidence nuisible sur la santé et l'environnement.

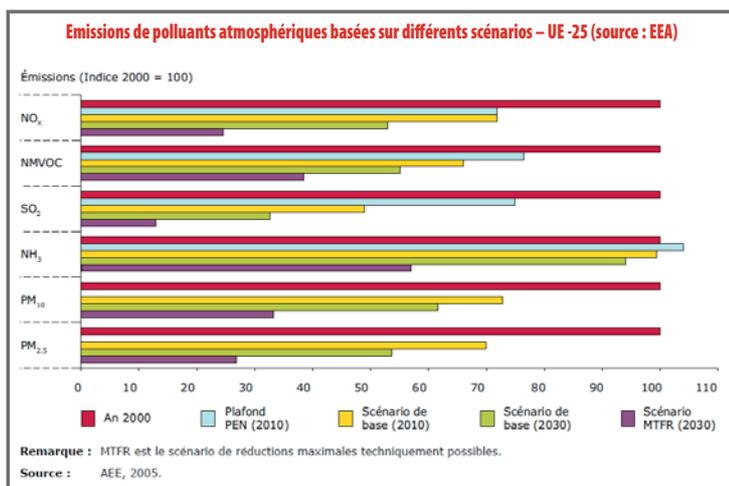
À l'échelle européenne, deux directives marquent la traduction réglementaire de cette prise de position :

- la directive CAFE, adoptée en 2008, concerne la qualité de l'air ambiant : elle fixe pour la première fois des valeurs limites pour la concentration en particules fines ;
- la directive NEC (*National Emission Ceilings*) fixe des limites d'émissions nationales pour quatre polluants : le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote, les composés organiques volatils et l'ammoniac. Les plafonds fixés pour 2010 vont être difficiles à atteindre pour la majorité des États membres. De nouveaux seuils devraient être fixés pour 2020.

**Objectifs d'émissions retenus pour la France  
dans le cadre de la directive NEC**

	<b>SO2</b>	<b>NO2</b>	<b>COV</b>	<b>NH3</b>
Emissions 1990 (kt)	1342	1905	2451	769
Objectifs 2010 (kt)	375	810	1050	780

Source : CITEPA - inventaire SECTEN 2002



Bien que les émissions soient en baisse régulière, chaque année en France ce sont encore plus de neuf millions de tonnes de polluants qui sont émis dans l'air par les activités humaines (industrie, automobiles, activités domestiques, agriculture, etc.). (Source : Ademe).

Plus que l'exposition à une pollution accidentelle, lourde et massive, de grande ampleur, c'est l'exposition continue, tout au long de la vie à des doses plus faibles qui a un impact sanitaire et environnemental fort. On constate une détérioration diffuse et graduée de la qualité de l'environnement par la dispersion de contaminants issus de l'activité anthropique très souvent dans le cadre de la vie quotidienne de tout un chacun, associée à notre mode de vie.

La lutte contre la pollution atmosphérique est un enjeu de santé publique : chaque européen perd en moyenne une année de vie à cause de la pollution de l'air. Les émissions de particules sont à l'origine en Europe d'environ 370 000 décès prématurés chaque année. (Source : EEA).

## Sols

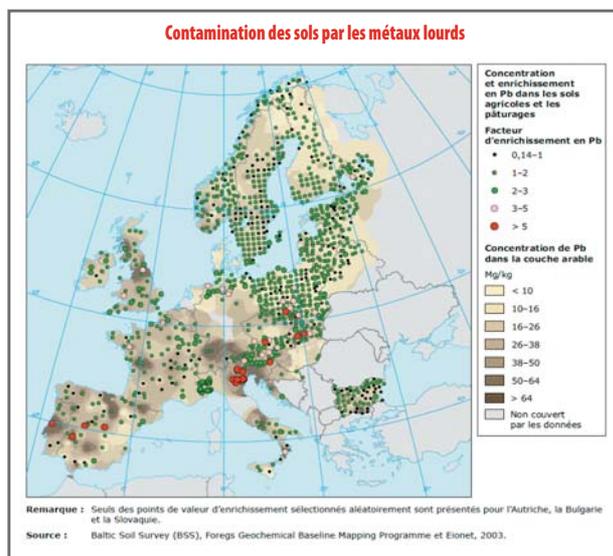
L'anthropisation a eu et a toujours un impact sur cette ressource : l'érosion, la diminution de matières organiques, la contamination, l'imperméabilisation... ont forcément un impact sur les fonctions des sols.

Or les fonctions du sol sont nombreuses et de différentes natures : fonction environnementale d'une part (biodiversité, stockage et épuration de l'eau...), économique (production agricole...), et enfin sociale (support de l'activité humaine). Cette ressource non renouvelable qui présente des processus de formation et de régénération extrêmement lents (plusieurs

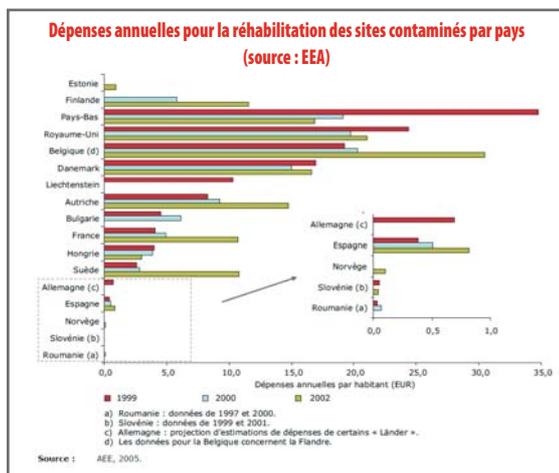
milliers d'années), subit des taux de dégradation potentiellement rapides (quelques années ou décennies).

Les processus de dégradation des sols sont de multiples natures : érosion, diminution des teneurs organiques, tassement, salinisation, glissement de terrain, contamination, imperméabilisation, déclin de la biodiversité... Les coûts de la dégradation des sols, même s'ils sont difficiles à estimer, sont considérables. La seule contamination des sols, due notamment à l'utilisation et/ou à la présence de substances dangereuses dans les nombreux produits de production industriels touche à l'échelle européenne plus de trois millions de sites dont 500 000 de manière sévère. (Source : EEA, *État des lieux 2005*)

Là encore, comme pour l'air et pour l'eau, la pollution peut être soit accidentelle, massive, localisée (site industriel, station service...) soit diffuse (retombées atmosphériques, pratiques agricoles).



Le marché français de la dépollution des sites s'élevait en 2007 à 0,8 Md€ et devrait atteindre 2,6 Md€ en 2020. 350 000 sites sont potentiellement pollués en France (source : inventaire BASIAS) qui représentent 100 000 ha pour un coût total (hors BTP) de l'ordre de 15 Md€ (source : étude BCG). Ce marché est tiré par le renforcement de la réglementation et par la pression immobilière. La France se situe au niveau des meilleures pratiques européennes : recensement des sites (Basol et Basias), traitement en fonction de l'usage futur, financement... grâce à un renforcement précoce de la réglementation par rapport au reste de l'Europe. Les acteurs français sont plutôt bien positionnés et se développent à l'international, notamment en Europe où le stock de sites pollués a été estimé à 138 Md€. (Source : d'après BCG, étude statistique européenne).



L'émergence d'un nouveau modèle économique devrait contribuer à la croissance du secteur si l'assouplissement de la réglementation en matière de responsabilité en France le permet : il s'agit, à l'image de ce qui a pu être mis en place aux États-Unis, de permettre aux industriels pollueurs de transférer leur responsabilité et risques associés à un tiers (professionnel de la dépollution, fonds d'investissement).

## Déchets

La gestion des déchets recouvre à la fois des activités de collecte et de transport, le recyclage de matériaux pour produire de nouveaux biens, l'incinération avec ou sans récupération énergétique, le compostage pour une récupération biologique, la réutilisation (par exemple de pièces automobiles) et enfin la mise en décharge.

La gestion « moderne » des déchets vise à la fois une réduction de l'impact environnemental de cette pollution potentielle et aussi la récupération de ressources devenues rares et de plus en plus coûteuses, sous l'effet de la demande croissante à l'échelle internationale. À titre d'illustration, entre 2001 et 2005, le coût des matières plastiques est passé d'une base 100 à presque 250. Dans le même temps, le prix du papier a doublé.

On observe ces dernières années une augmentation très forte des prix de certains métaux rares pour lesquels un risque de pénurie se fait sentir. Après le pic de début 2008, puis la très forte chute à partir de l'été 2008 (crise économique), les cours de la plupart des matériaux ont retrouvé en 2010 des valeurs voisines de celles de 2007. Le marché des matériaux issus de déchets est aussi volatil que celui des matières vierges, avec une part croissante d'échanges internationaux de matières issues de déchets.

### Évolution des prix – métaux rares\*

Métal	Date d'épuisement*	Évolution des prix 2000 à 2007*
Zinc	2025	+ 100 %
Étain	2028	+ 173 %
Plomb	2030	+ 445 %
Cuivre	2038	+ 263 %
Nickel	2048	+ 221 %
Fer	2087	-
Aluminium	2139	+ 48 %

Ce déséquilibre des marchés des matières premières minérales est dû à la progression de la demande des pays émergents : en 2025, l'Inde et la Chine pourraient consommer 50 % de l'acier mondial. En parallèle, les gisements les plus facilement exploitables et les plus abondants tendent à s'épuiser.

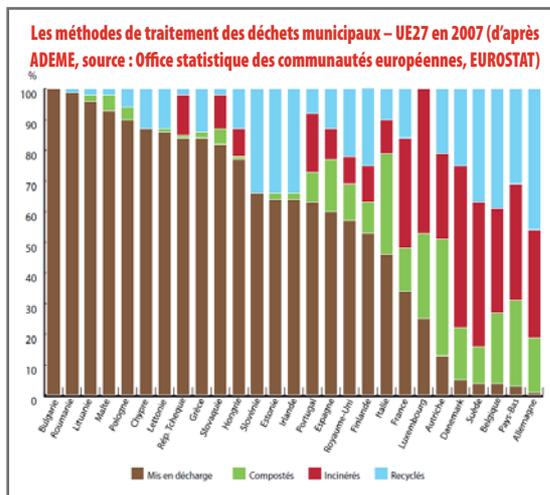
La gestion des déchets s'impose donc à double titre : raréfaction des matières premières et pollution potentielle.

Aujourd'hui, l'augmentation du volume de déchets reste comparable à celle de la croissance économique ; en France, en 2008, 868 millions de tonnes de déchets ont été produites. (Source : Ademe).

Les plus gros secteurs producteurs de déchets en France en 2008 sont l'agriculture et la sylviculture (43 %) et le BTP (41 %). Une bonne partie de ces déchets sont traités *in situ* et ne rentrent pas dans l'économie du déchet (ni par la prestation de service, ni par la vente de matières). Viennent ensuite les entreprises pour 10 % du volume, les ménages (3 % du volume), les collectivités et les déchets d'activité de soins. (Source : Ademe).

En 2007, près de 38 Mt de déchets municipaux ont été collectés, dont 10,8 Mt en déchèterie. 33,5 % des déchets ménagers et assimilés collectés par le service public ont été orientés vers le recyclage (valorisation matière et gestion biologique) et 29 % vers la valorisation énergétique. (Source : Ademe, chiffres clés 2009).

Les pratiques en terme de traitement de déchets municipaux sont assez hétérogènes au niveau européen, l'Allemagne restant le « champion » du recyclage.



Les engagements du Grenelle de l'environnement sur les déchets sont traduits dans le plan d'action sur les déchets publié par le ministère du Développement durable en septembre 2009. L'objectif de la politique nationale traduite dans ce plan est de poursuivre et amplifier le découplage entre croissance et production de déchets. Le plan d'actions mis en place prévoit de :

- réduire de 7 % la production d'ordures ménagères et assimilées par habitant sur les cinq premières années ;
- porter le taux de recyclage matière et organique des déchets ménagers et assimilés à 35 % en 2012 et 45 % en 2015. Ce taux est fixé à 75 % dès 2012 pour les déchets des entreprises et pour les emballages ménagers ;
- diminuer de 15 % d'ici à 2012 les quantités partant à l'incinération ou au stockage.

Il s'inscrit pleinement dans les engagements communautaires, traduits dans la directive européenne du 19 novembre 2008 qui établit une hiérarchisation d'interventions sur les déchets : prévention, préparation en vue du réemploi, recyclage, autres valorisations notamment énergétique, élimination.

La France possède les leaders mondiaux (Veolia Propreté et Sita du groupe Suez) pour industrialiser la filière de recyclage et des acteurs dans l'ensemble de la chaîne de valeur (équipement de collecte, centres de tri, usines d'incinération, service-recyclage).

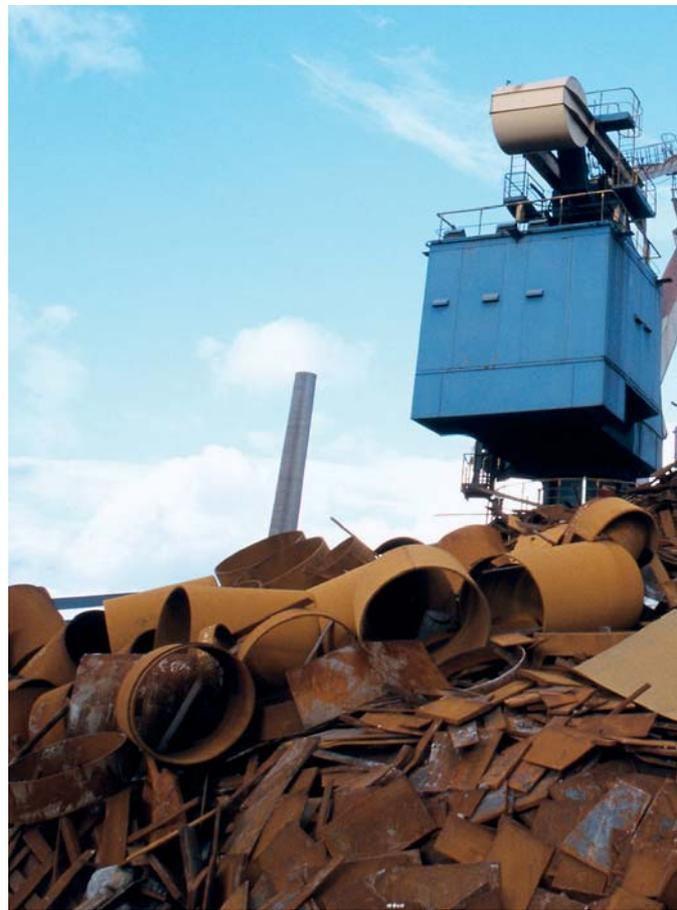
## Les grandes tendances d'évolution du secteur

### Eau

Le savoir faire au niveau français et plus largement européen en termes de fourniture et de traitement de l'eau est indéniable. En réponse aux enjeux sur la qualité et la quantité de l'eau précisés plus haut, trois axes forts devraient orienter l'activité du domaine dans les années à venir :

- augmenter la quantité d'eau disponible : cela passe tant par la récupération et réutilisation des eaux de pluie, le dessalement de l'eau de mer, le recyclage et filtration de l'eau, le rechargement des nappes phréatiques... ;
- réduire son utilisation : accroissement du rendement agricole, réduction de l'intensité hydrique de certains procédés industriels, systèmes de détection des fuites dans les réseaux ;
- travailler à améliorer la lutte contre la présence des polluants émergents : identification, détection, élimination... toute la chaîne est concernée. Pour les eaux marines, l'amélioration de la qualité doit se poursuivre notamment par une meilleure gestion des bassins versants.

De manière transversale, un suivi métrologique fin est un pré-requis à la gestion de cette ressource, tant d'un point de vue quantitatif que qualitatif. Ces systèmes de mesure devront être adaptés à l'acquisition de données sur les substances émergentes.



### Air

La lutte contre la pollution atmosphérique doit continuer, que cela soit en amont au titre de la prévention ou en aval, sur le traitement des effluents contaminés.

Il s'agit de développer des procédés et technologies propres pour la réduction des émissions à la source. Ceci est évidemment transverse en termes de secteurs applicatifs concernés : transports bien sûr avec par exemple des systèmes de post-traitement mais aussi bâtiment, peintures, ameublement... La libération de formaldéhyde par les meubles fabriqués à partir de panneaux de particules en est un exemple issu de l'actualité récente. Travailler en amont à l'utilisation de nouvelles colles ou à une diminution de la concentration devrait permettre de diminuer la quantité de formaldéhyde dans l'air. Plus largement, la qualité de l'air intérieur a plus récemment attiré l'attention des spécialistes. Relevant de la sphère privée, elle ne fait pas pour l'instant l'objet de valeurs limites définies et donne lieu à des difficultés d'investigation.

Au-delà de la prévention et de la réduction à la source, le développement de technologies de traitement des effluents gazeux, adaptées notamment aux polluants émergents doit faire l'objet d'une attention particulière.

Ceci nécessite le développement de la métrologie à la source, avec une approche allant de l'exposition individuelle à une vision globale, typiquement satellitaire. Ces deux visions sont com-



plémentaires et permettent d'apporter une réponse à la nécessité de collecter des données précises et spatialisées. Un couplage sol-satellite donnant une image fortement résolue dans l'espace et complète est largement plébiscité.

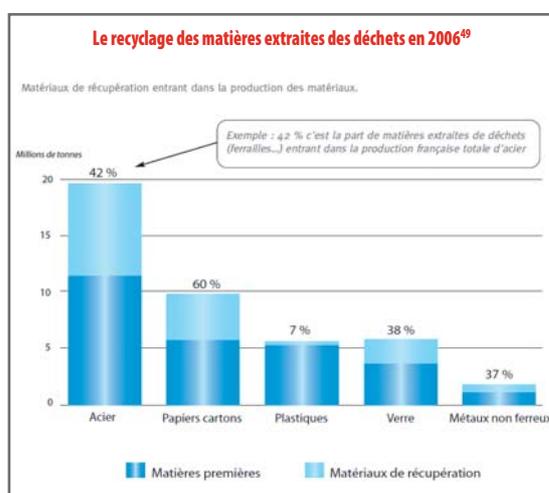
### Déchets, production et consommation durables

Dans le domaine de la gestion des déchets, on assiste au passage d'une approche environnementale de la gestion des déchets à une approche davantage économique : le déchet n'est plus seulement une contrainte à minimiser mais une ressource à optimiser, permettant l'émergence d'une véritable économie circulaire. Ainsi, le recyclage et la valorisation des déchets ont été identifiés (étude BCG en 2008, puis étude CGDD, mars 2010) comme l'une des 18 filières vertes, avec un potentiel de croissance et d'emploi significatif.

Quatre axes majeurs figurent dans le plan d'actions 2009-2012 du MEEDDM et devraient orienter l'activité dans le domaine dans les années à venir :

- la priorité est mise à la réduction à la source : réduction des emballages, diminution des quantités de matière utilisées, allègement... ceci implique aussi forcément une évolution des usages et des pratiques des consommateurs, des entreprises ;
- le développement de la réutilisation et du recyclage doit être un axe fort : au-delà des questions purement technologiques

que cela soulève, cela nécessite en amont le renforcement ou la mise en place des actions de collecte et de tri ; l'harmonisation des consignes de tri, et surtout l'extension de la responsabilité élargie des producteurs à systèmes spécifiques d'organisation et de financement, qui seront étendues progressivement à de nouveaux flux de déchets comme les déchets dangereux diffus des ménages, les déchets d'activités de soins à risques infectieux et les déchets encombrants. Cela complètera les filières existantes pour les emballages, papiers, équipements électriques et électroniques, piles et batteries, textiles, pneumatiques et véhicules hors d'usage ;



- mieux valoriser les déchets organiques : sur les déchets collectés par le service public en 2007, seuls 14 % faisaient l'objet d'une gestion biologique, alors que plus de 50 % des ordures ménagères résiduelles sont constituées de déchets organiques (source : MEDDTL, politique de déchets 2009-2012). Compostage domestique, obligation pour les gros producteurs, travail sur les débouchés, méthanisation, les pistes sont nombreuses ;
- mieux gérer les déchets du BTP : aujourd'hui, si deux tiers des déchets du bâtiment sont valorisés, les marges de progression restent nombreuses car ils représentent à eux seuls plus de 40 % du volume de déchets produits chaque année. La politique de déchets 2009-2012 prévoit à ce titre la mise en place de système d'aides aux bonnes pratiques de recyclage, incitations fiscales, et en aval encourage la déconstruction sélective, l'orientation vers les filières adaptées... Un objectif pourrait être la réutilisation au maximum sur site, du moins pour la reconstruction. Les enjeux principaux concernent le diagnostic, la modélisation, la collecte, ainsi que la formation des acteurs. Une question se pose en termes d'acceptabilité par les acteurs, la profession étant globalement peu encline au changement. Plus largement, la question de la gestion des déchets est à rapprocher de la consommation et de la production durables. Il est de plus en plus admis que nos schémas actuels de consommation et de production, ainsi que leurs impacts environnementaux en termes de cycle de vie doivent évoluer.

## Les tendances technologiques et les technologies clés

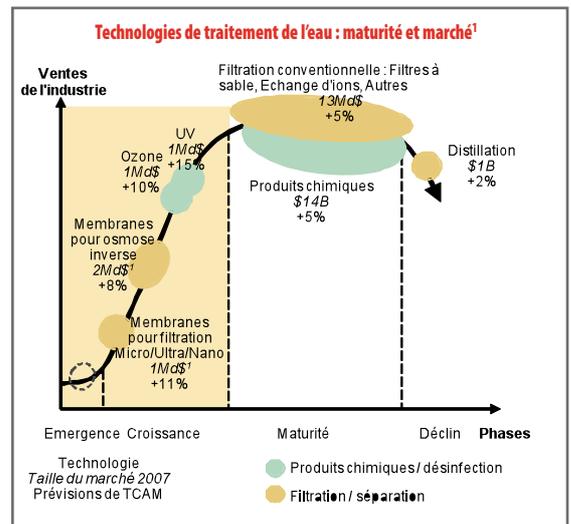
D'un point de vue technologique, deux tendances sont structurantes pour le secteur :

- la place croissante de la métrologie environnementale est indispensable au diagnostic, à la prévision et à l'évaluation de la pollution, de l'eau, mais aussi de l'air, des sols... Cela se traduit à la fois par un besoin croissant de capteurs, mais aussi d'intégration, de réseaux de capteurs, de mesure en continue. Des solutions logicielles de gestion et de diagnostic environnemental sont à développer. Par ailleurs, la prévention des risques naturels à partir d'observation satellitaire doit être un axe à développer : le couplage de données hydrographiques, météo, terrain doit permettre d'apporter un outil pertinent pour la prévention des risques naturels, par exemple dans le cadre des plans de prévention des collectivités locales ;
- avoir une approche durable de la production et de la consommation. Notre façon de produire et de consommer contribue au réchauffement climatique, à la pollution, à l'utilisation des matières premières et à l'épuisement des ressources naturelles. Une utilisation plus efficace des ressources est un facteur d'innovation important, et un facteur de différenciation pour la compétitivité de l'industrie française. Il convient de favoriser l'émergence des innovations, des technologies, des matériaux qui seront nécessaires à la mise en œuvre de nouvelles solutions éco-responsables. L'approche de la production en termes de cycle de vie est à favoriser, le concept d'éco-conception a bien sûr un rôle central à jouer.

L'éco-conception correspond à l'intégration des aspects environnementaux dans la conception ou la re-conception de produits.

Il s'agit de prendre en compte les exigences environnementales sur le produit : réglementation, image de marque, etc... ainsi que les conséquences environnementales du produit : consommations de ressources, émissions atmosphériques, production de déchets, valorisation du produit en fin de vie, etc.

Dans le domaine de l'eau, les savoir-faire de nos champions nationaux doivent être valorisés pour développer des technologies de dessalement de l'eau à faible charge énergétique. Des opportunités existent également sur plusieurs niches technologiques : systèmes de gestion efficace de l'eau, technologies innovantes pour le traitement de l'eau, capteurs de mesure de qualité...



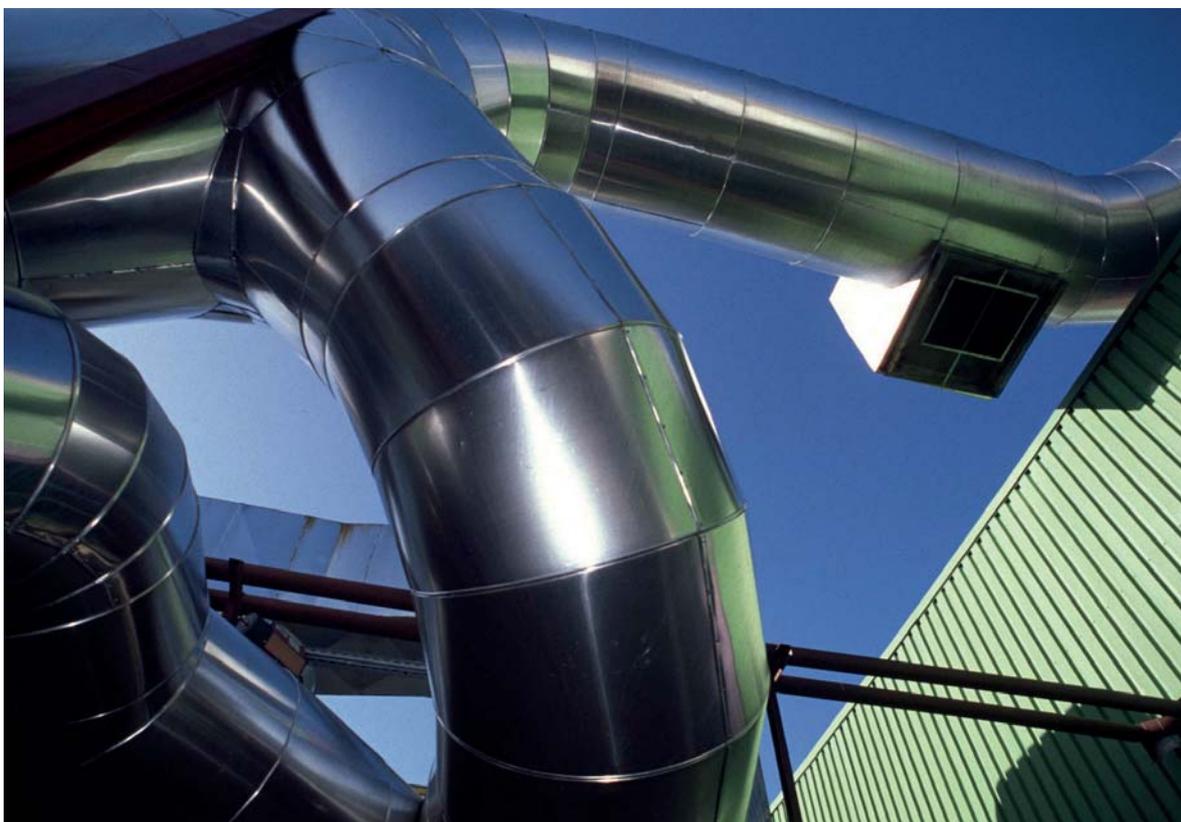
Les acteurs français maîtrisent l'intégration de ces systèmes, même sans capacité de fabrication.

Dans le domaine de la réhabilitation des sols contaminés, les tendances technologiques concernent essentiellement le développement de technologies de traitement sur site, des sols pollués. Les technologies pour la captation et le traitement des sédiments pollués sont également clés.

Dans le domaine de la gestion des déchets, les enjeux sont autant dans le mode de collecte (tri amont), que dans les technologies permettant le tri industriel des déchets et dans les technologies permettant une nouvelle utilisation. Dans ce secteur, les seules technologies ne peuvent pas répondre à tous les enjeux : l'arrivée sans cesse de nouveaux types de produits sur le marché impose un renouvellement permanent des processus de démontage et de tri. La prise en compte en amont de cet aspect, notamment via la diffusion de l'éco-conception devrait permettre de faciliter ces étapes.

Des technologies, mais aussi des sites industriels pour le recyclage et la valorisation des matériaux rares doivent être développées. De même, les déchets organiques doivent faire l'objet d'une attention particulière, tant sur l'aspect des technologies de tri que de leur valorisation. De nouvelles perspectives apparaissent dans le domaine de la chimie, en lien avec le recyclage, notamment pour le développement du taux de recyclage des plastiques, encore beaucoup trop faible [65]

Les « équipementiers du déchet », fabricants de matériels et d'équipements pour une gestion optimisée de nos déchets, sont appelés à jouer un rôle croissant, car le recyclage et la valorisation par flux génèrent plus de besoins en équipement que l'enfouissement ou l'incinération de déchets en mélange, rapportée à la tonne collectée. Il s'agit pour ces fabricants d'être en capacité à proposer des outils, machines, pour la manutention, le transport, le tri automatisé, le broyage, le conditionnement... L'offre française apparaît encore trop fragmentée et pourrait être mieux organisée, notamment vis-à-vis de l'export. Certaines de ces technologies sont stratégiques car conditionnant l'accès à de nouveaux gisements de matières issues de déchets.



Enfin, des progrès sont à réaliser au niveau des technologies pour l'exploration, l'extraction et le traitement des ressources minérales pour faire face à l'amenuisement des ressources disponibles et à l'explosion des besoins.

### Les technologies clés du secteur de l'environnement

- 30. Technologies pour la captation maîtrisée et le traitement des sédiments pollués.
- 31. Capteurs pour l'acquisition de données.
- 32. Technologies pour le dessalement de l'eau à faible charge énergétique.
- 33. Technologies pour le traitement des polluants émergents de l'eau.
- 34. Technologies pour le traitement de l'air.
- 35. Technologies pour la dépollution *in situ* des sols et des sites pollués.
- 36. Technologies pour la gestion des ressources en eau.
- 37. Technologies pour le recyclage des matériaux rares et leur valorisation.
- 38. Technologies de tri automatique des déchets.
- 39. Valorisation matière des déchets organiques.
- 40. Éco-conception.

## Analyse de la position de la France

### La dépense de recherche et développement en environnement

En 2007, la dépense de recherche et développement (R&D) en environnement est évaluée à 2,6 milliards d'euros, soit une hausse de 8,3 % par rapport à 2006. Cela représente environ 7 % de la dépense totale de R&D en France.

En 2007, les administrations publiques consacrent 1 Md€ pour la R&D en environnement, soit une progression de 1,7 % par rapport à 2006. Les programmes de recherche sont mis en œuvre par les établissements publics à caractère scientifique et technologique, comme le CNRS, le Cemagref, l'Ifremer et par les établissements publics industriels et commerciaux (Épic).

La dépense en R&D des entreprises s'élève à 1,6 milliard d'euros en 2007, en forte hausse par rapport à 2006 (+ 13 %). D'après la dernière enquête du ministère chargé de la Recherche, la part de l'environnement au sein de la R&D des entreprises a atteint 6,4 % en 2007<sup>1</sup>.

(1) Ces dépenses de R&D ne comprennent que les travaux spécifiquement orientés vers la protection de l'environnement. Des programmes identifiés dans la Mission interministérielle de recherche et d'enseignement supérieur sous les objectifs « Énergie », « Espace » ou encore « Transport, aéronautique » peuvent avoir des utilisations dans les domaines de l'environnement, mais les dépenses correspondantes ne sont pas comptabilisées.

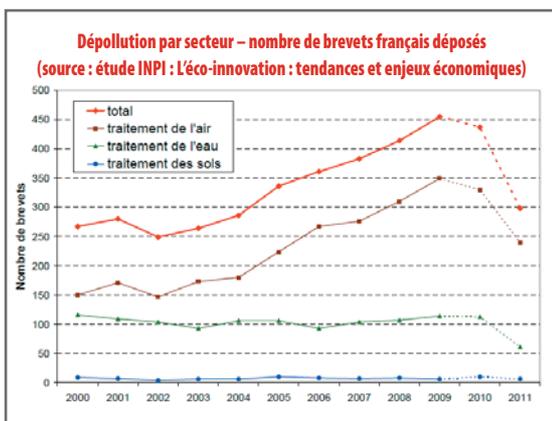
Le financement de la dépense de R&D en environnement est réparti entre entreprises et administrations publiques de la manière suivante :

**Financement de la dépense de R&D en environnement**  
(source : SOeS – Commission des comptes et de l'économie de l'environnement, mai 2009)

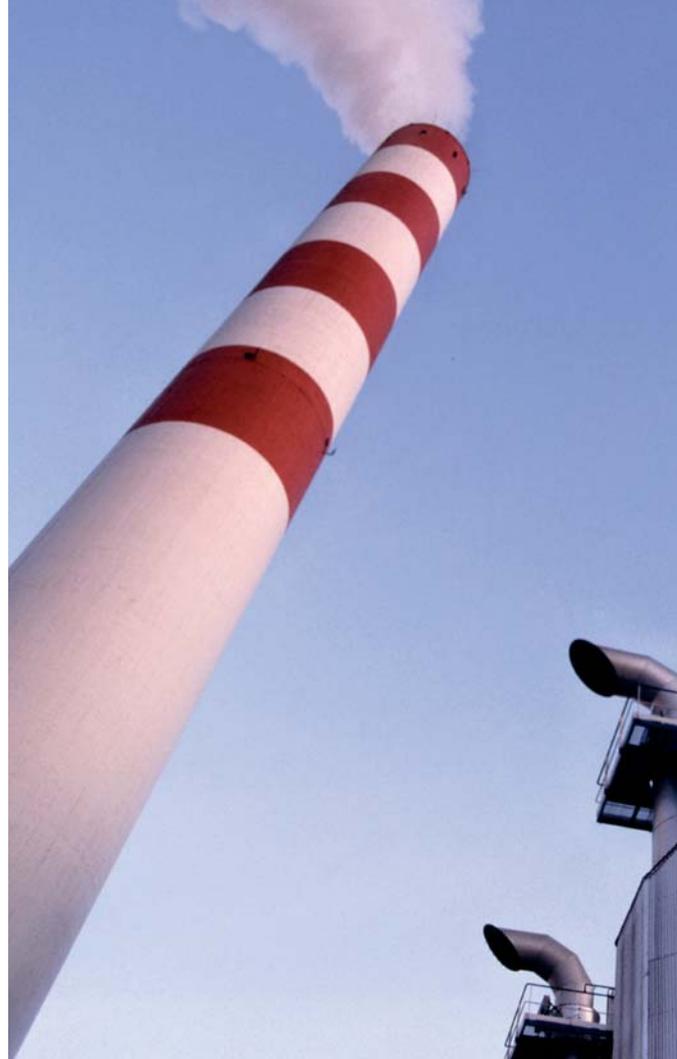
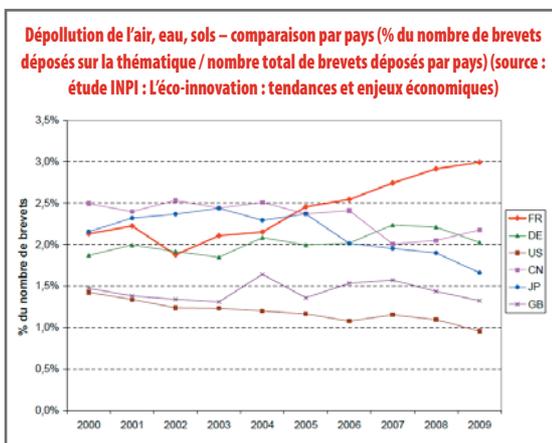
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007p
Administrations publiques	1 342	1 574	1 635	1 675	1 653	1 748	1 026	1 043
Entreprises	851	917	958	975	1 112	1 085	1 414	1 601
<b>Total</b>	<b>2 194</b>	<b>2 491</b>	<b>2 592</b>	<b>2 650</b>	<b>2 766</b>	<b>2 833</b>	<b>2 440</b>	<b>2 644</b>

## Dépollution eau - air - sol

Ces efforts en matière de R&D se traduisent par un nombre important de brevets déposés en France dans le domaine de la dépollution. Les domaines de l'air et de l'eau sont les plus actifs. Une étude menée par l'INPI recense une nette augmentation du nombre de dépôts dans le domaine de l'air depuis 2002 (passant de 150 à 450 dépôts par an) mais prévoit une diminution du nombre de dépôt en 2010 et 2011.



Depuis 2005, la part des brevets consacrés à la dépollution de l'eau, de l'air et des sols est plus élevée en France que dans les autres pays (États-Unis, Japon, Allemagne, etc...).



Seules la France et la Chine voient la proportion du nombre de dépôts concernant ces thématiques augmenter chaque année, alors que dans le même temps, en Allemagne, aux États-Unis au Japon et en Grande-Bretagne, la proportion diminue.

Dans le domaine de l'eau, la position de la France est majeure : deux acteurs français, Veolia et Suez, sont les leaders mondiaux sur les marchés de l'ingénierie, de la construction et de l'exploitation (services). Ils sont, et de loin, les deux plus gros fournisseurs en termes de millions de personnes desservies. Mais peu d'acteurs français sont présents sur le marché de l'équipement (membranes, filtres, pompes...).

Ce marché est peu ouvert, les acteurs y sont bien établis. Mais des opportunités existent cependant dans des niches sur lesquelles les PME françaises doivent se positionner.

Les trois nouveaux pôles de compétitivité labellisés sur la thématique au premier trimestre 2010 devraient permettre d'encourager les partenariats entre grands groupes, PME/start up et recherche publique. Leur apport pourrait être également substantiel sur le volet de la formation.

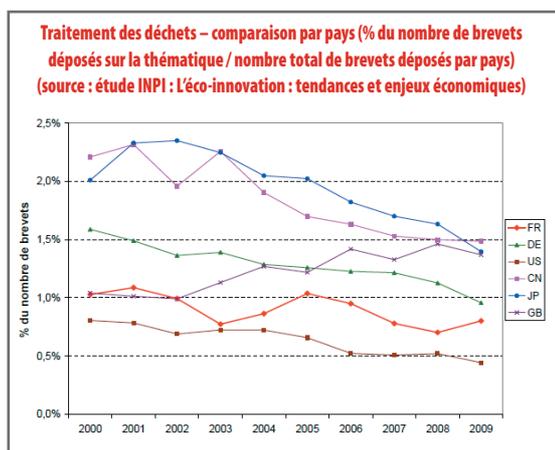
Dans le domaine des sols et sites pollués, les entreprises françaises sont très présentes : en amont, dans les phases d'étude et d'ingénierie mais surtout dans les phases de travaux. Sita Remédiation est d'ailleurs le leader européen dans ce domaine.

La R&D publique n'est pas en reste, avec des acteurs reconnus tels que l'École des mines de Douai. Là encore, la structuration de réseaux autour des pôles Team2, Risques, le projet Sédimatériaux doivent permettre à terme de renforcer la position française et contribuer notamment à un transfert de technologie vers le monde de l'entreprise.

En matière de traitement des déchets, la recherche française est moins active que celle des autres pays : la part des brevets



consacrés à ce domaine est largement en dessous des niveaux japonais, américain, allemand, et même chinois. La France possède toutefois les leaders mondiaux pour industrialiser la filière du recyclage : Veolia via Onyx, et Suez grâce à Sita.



Les entreprises françaises sont présentes sur l'ensemble de la chaîne de valeur : équipements de collecte, centres de tri, usines d'incinération, recyclage, services ... Enfin, en ce qui concerne la métrologie environnementale, le potentiel français dans ce domaine est complet : recherche publique, pôles de compétitivité sur lesquels s'appuyer : Axelera, Risques, pôle Mer Paca et Mer Bretagne, Trimatec... Les domaines d'application de la métrologie sont extrêmement vastes, en raison de l'évolution des usages, de la généralisation des « comportements citoyens » qui amène à trier les déchets, économiser l'eau, à la réorientation des modes de consomma-

tion. Tout cela crée un besoin nouveau en capteurs divers, offrant un large potentiel de marché.

De plus, ces secteurs sont fortement poussés par la réglementation : cela aussi joue un rôle moteur dans le développement de nouvelles technologies, consommatrice de capteurs.

## Recommandations

L'urgence environnementale et les éco-technologies constituent l'un des trois axes prioritaires de la SNRI. Les opportunités de croissance pour les entreprises françaises sont immenses et doivent permettre de répondre aux nombreux enjeux décrits plus haut. Le développement d'outils et moyens de mesure doit permettre de comprendre et de mieux modéliser l'évolution du climat et de la biodiversité, ainsi que de mieux comprendre la réaction du vivant aux agressions extérieures liées aux activités humaines pour en assurer une meilleure protection. Dans ce contexte, les investissements d'avenir prendront en compte de manière significative ces axes et favoriseront le transfert vers l'industrie de moyens et technologies innovants.

L'approche des questions environnementales et des réponses technologiques qui doivent être portées pour en améliorer la prise en charge passe nécessairement par une approche systémique. En effet, il est encore fréquent que les actions mises en place dans un domaine particulier (réglementation, soutien à l'innovation...) pour traiter une question donnée (la qualité de l'air par exemple) ne se fassent pas de manière intégrée ou conjointe avec celles centrées sur un domaine connexe mais au final étroitement lié (le changement climatique par exemple). De fait, synergies et antagonismes des dispositions ne sont que trop peu étudiés en amont. Une approche multicritères de l'évaluation des réglementations, des technologies... devrait pouvoir permettre de prendre en compte l'ensemble des effets envisageables dans une logique d'analyse du cycle de vie complet.

Pour adopter une approche systémique de la protection de l'environnement, la place des services et de l'innovation dans les services va devenir de plus en plus centrale. Ces services doivent permettre d'apporter les informations nécessaires pour la mise en place de solutions intégrées, facilement utilisables pour les PME et collectivités concernées. Ces services peuvent être soit liés directement à une technologie (sur le modèle de Environnement SA par exemple) ou apporter des compétences sur le bilan carbone, l'analyse de cycle de vie ...

L'utilisation de ces méthodologies passe également par une sensibilisation, voire une formation sur ces aspects. L'Ademe est porteur aujourd'hui de cette mission. Les pôles de compétitivité vont également avoir un rôle à jouer sur ce volet, notamment pour anticiper les besoins sur des métiers nouveaux et anticiper les mutations en conséquence.

Enfin, l'accès aux marchés publics par les PME du secteur de la protection environnementale au sens large pourrait être facilité dans un domaine où 60 % du marché passe par la commande publique.



## 30. Technologies pour la captation maîtrisée et le traitement des sédiments pollués



### Description

Les sédiments qui reposent au fond de la mer ou des cours d'eau, des lacs et des barrages sont bien souvent pollués. Ils contiennent des métaux lourds, des pesticides, et d'autres polluants organiques persistants qui se sont accumulés au cours du temps.

Or, pour entretenir et approfondir les voies navigables, les ports et leur accès, tant à l'intérieur qu'au large, il est parfois nécessaire de retirer ou déplacer ces sédiments : c'est l'opération de dragage. Les sédiments les plus pollués doivent ensuite être traités afin de pouvoir être valorisés comme matière première.

Le dragage des sédiments peut s'avérer plus néfaste pour l'environnement que le fait de les laisser en place. Les polluants piégés, au moins temporairement, dans les compartiments sédimentaires risquent d'être remobilisés, et dispersés dans l'écosystème.

Le dragage peut être effectué mécaniquement ou par aspiration des sédiments. Les sédiments dragués peuvent ensuite connaître des sorts divers : mise en dépôt sur site confiné, épandage, régilage sur berge (cette technique présente toutefois un inconvénient majeur lié à la création d'un cordon de curage riche en azote qui empêche le ruissellement des eaux), mais aussi traitement et valorisation :

- le traitement : prétraitement par déshydratation, lavage, techniques végétales, traitement biologique, physique, chimique, inertage, stabilisation-solidification, incinération... Ce sont les caractéristiques physiques des produits qui influencent les procédés de traitement. Le plus souvent, plus les particules sont fines, plus elles sont chargées en métaux lourds et/ou polluants organiques ;

- la valorisation : par exemple, réemploi dans des remblais, pour la production de matériaux (après stabilisation-solidification permettant de solidifier et stabiliser durablement les polluants), stabilisation-fertilisation de sols en friche, etc.

Les verrous à lever sont de plusieurs sortes et portent sur la gestion durable des sédiments :

- la modélisation de leur transport ;
- la caractérisation des sources de pollution : elle provient généralement de rejets d'origine variée (industriels, agricoles, urbains) qui sont mélangés entre eux et véhiculés par l'eau et la matière en suspension. Ces phénomènes favorisent la dispersion et la transformation chimique des polluants ;
- l'extraction des sédiments : mise au point des solutions alternatives au dragage ou amélioration des techniques d'aspiration permettant de les capter, sans libérer les polluants piégés ;
- l'amélioration de la gestion des dépôts de dragage, du traitement et de la valorisation des sédiments : développement de techniques de gestion et traitement *in situ* (« capping » des sédiments, valorisation matière... ) ;
- la diminution des coûts de traitement : les traitements physico-chimiques, biologiques ou thermiques demeurent onéreux et sont réservés à des volumes réduits de sédiments fortement pollués.

### Applications

Le territoire français compte 525 000 km de cours d'eau et ces cours d'eau transportent chaque année six millions de m<sup>3</sup> de sédiments, en moyenne.

Environ 50 millions de m<sup>3</sup> de sédiments sont dragués par an. 25 millions de m<sup>3</sup> de sédiments sont déplacés par les trois principaux ports d'estuaire, Rouen, Nantes-Saint Nazaire et Bordeaux. Les cinq grands ports maritimes, La Rochelle, Dunkerque, Calais, Boulogne et Le Havre draguent 6,2 millions de m<sup>3</sup> de sédiments (moyenne annuelle).

La principale motivation du dragage (70 % concernent les cours d'eau pour le dragage continental) est le maintien de la navigation mais aussi la prévention des inondations. Le coût moyen du dragage en Europe est légèrement supérieur à 1 €/m<sup>3</sup> mais avec le traitement, le coût peut atteindre 100 €/m<sup>3</sup>, impliquant des coûts très élevés pour les opérations d'envergure.

La valorisation matière des sédiments de dragage nécessite souvent une pollution faible ou nulle de ces sédiments. Après traitement, on peut envisager leur valorisation dans des matériaux de construction, des matériaux routiers ou des anthrosols pour lesquels la pollution doit être *a minima* faible [14].

#### Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion
● Diffusion croissante
● Généralisation

#### Degré de diffusion en France

● Faible diffusion
● Diffusion croissante
● Généralisation

## Enjeux et impacts

L'enjeu est à la fois économique et écologique. Économique puisque le dragage permet le maintien de la navigation. Écologique, car la gestion durable des sédiments fait partie intégrante de la protection et la préservation des écosystèmes côtiers et continentaux.

Le dragage d'un cours d'eau peut en effet induire une perturbation du milieu aquatique en remettant en suspension des sédiments susceptibles de migrer dans des zones déjà curées ou non envasées, entraînant une modification physico-chimique du milieu, la surabondance d'éléments nutritifs, l'augmentation de la biodisponibilité entre les sédiments en suspension... Les nuisances peuvent aussi être sonores (par l'opération de dragage elle-même), et olfactives (les sédiments pollués contenant – ou pouvant générer – des gaz de type méthane ou des composés soufrés tels que H<sub>2</sub>S qui peuvent dégager des odeurs lors de leur transport ou dans les bassins de dépôt).

Une pollution de grande ampleur s'est produite en 1973 aux États-Unis suite au démantèlement du barrage de Fort Edwards sur l'Hudson et a conduit à la libération en aval de sédiments chargés en PCB et jusqu'alors retenus en amont par le barrage. 150 000 m<sup>3</sup> de sédiments contaminés ont dû être enlevés et en 1983, tout un tronçon de la rivière en aval était inscrit au programme américain de lutte contre la pollution (Superfund). La question des sédiments retenus en amont des barrages se pose donc systématiquement dès lors que le démantèlement est envisagé [15].

Les réglementations française et européenne interdisent désormais le rejet, dans le milieu marin, des vases (et sédiments) polluées (charge toxique supérieure à un certain seuil). Les collectivités doivent donc prévoir un traitement à terre coûteux (volumes à traiter considérables et complexité du processus).

Au moins quatre textes traitent de l'évaluation de la qualité des sédiments et des procédures administratives à respecter pour la réalisation des travaux. Ces textes définissent les niveaux de référence à prendre en compte lors d'une analyse de sédiments marins ou estuariens en milieu naturel ou portuaire (arrêté du 14 juin 2000).

Un meilleur contrôle des pollutions en amont permettrait de limiter les besoins de traitement des sédiments dragués, et donc de diminuer les coûts pour les collectivités.

Le projet Sédimatériaux, porté par le MEEDDM, la Région Nord-Pas-de-Calais, l'État, le CD2E et l'École des mines de Douai, vise à évaluer les solutions de valorisation pour aider à adapter la réglementation sur le recyclage des sédiments.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- R&D : Ecole des Mines de Douai, ESITCaen (Ecole d'Ingénierie et des travaux de la construction), BRGM, INERIS, CEMAGREF, VNF, CNR, EDF
- ARD Normandie, Eurovia, Extract-Ecoterres, Alzeo Environnement, Saur
- Pôles MER Bretagne et Mer PACA, Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sites, Sols et Sédiments Pollués (GIS 3SP), CD2E, pôle de compétitivité TEAM2, AXELERA

### Principaux acteurs étrangers

- Solvay, Deltares/TNO (NL), ISSEP (Be), Federal Institute of Hydrology (D), NGI (NO)

## Position de la France

La réglementation pousse ce marché, mais elle n'est pas uniforme partout en Europe. Ainsi la Belgique est moins sévère que la France sur certains aspects mais plus sévère sur d'autres.

En France, au niveau des ports, c'est celui de Dunkerque qui est le plus en avance sur la question.

## Analyse AFOM

### Atouts

Projets Sédimatériaux, Sedimed, Depoltex, avance technologique et structuration de la filière en cours.

### Faiblesses

Difficulté à capitaliser et à transférer les connaissances.

### Opportunités

Contexte réglementaire interdisant le rejet de vases et sédiments pollués.

### Menaces

Verrou réglementaire.

## Recommandations

Un verrou réglementaire fort freine actuellement la diffusion de ces technologies : en effet, même traités, les sédiments sont considérés comme un déchet ce qui limite leur valorisation (d'autant que dans les pays frontaliers, les réglementations sont plus favorables). Apporter une solution législative à ce point pourrait permettre un véritable effet levier favorable au développement de ces technologies. C'est ce que devrait permettre le projet Sédimatériaux.

## Liens avec d'autres technologies clés

37

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



# 31. Capteurs pour l'acquisition de données

## Définitions

On distingue deux types de capteurs : les capteurs biologiques, et les capteurs non biologiques c'est-à-dire chimiques, physiques...

Les capteurs intelligents : système fournissant, outre la mesure (par un ou plusieurs capteurs) d'autres services ou fonctionnalités, des fonctions d'auto-test et d'auto-contrôle, de contrôle à distance, les conditionneurs associés aux capteurs, des fonctions de calcul interne (impossible avec un capteur classique), une interface de communication...

Les réseaux de capteurs correspondent au déploiement de micro-capteurs, dans une zone géographique appelée champ de captage, qui permettent de récolter et transmettre des données environnementales de manière autonome.

Le traitement des données désigne la transformation en contenus numériques exploitables par des applications en temps réel (applications embarquées) ou en temps différé.

## Description

La métrologie est un outil indispensable de diagnostic, de prévision et d'évaluation de la pollution de l'eau, des sols, de l'air.

Elle regroupe un ensemble de systèmes, d'éléments ou de fonctions, tous aussi importants les uns que les autres :

- les capteurs eux-mêmes ;
- les capteurs intelligents ;
- les réseaux de capteurs et leur intégration ;
- la modélisation ;
- le traitement des données [21].

Chaque type de pollution présente ses spécificités : il y a autant, sinon plus, de techniques de mesure que de polluants à détecter. Mais outre un impact sur l'instrumentation de mesure et donc sur les données à acquérir, ces différentes pollutions nécessitent la définition d'indicateurs adéquats. Il s'agit de déterminer les paramètres de contrôle pertinents de la qualité environnementale d'un milieu naturel (eau [13], air ou sol). Il peut par exemple s'agir d'indicateurs de mesure de la qualité chimique ou biologique de l'eau, de mesure quantitative d'une espèce sur un domaine par exemple.

Ce champ technologique pose des questions de développement liées aux verrous technologiques suivants :

- la détection des « cocktails » de polluants, notamment les polluants « émergents » type médicaments, dont les métabolites peuvent s'associer et pour lesquels il reste beaucoup à faire en matière de détection ;
- l'autonomie énergétique des capteurs : les capteurs déportés permettent de suivre un système à distance sans le perturber. Mais les temps d'expérimentation sur les milieux naturels sont très longs : il est par conséquent nécessaire d'avoir des systèmes de mesures autonomes en énergie ;
- la fiabilisation et la précision dans le traitement des données mesurées ;
- le développement de la mesure en continu (temps réel) ;
- l'amélioration du couplage entre mesure terrestre (marine inclus) et mesure satellitaire : le couplage de données hydrographiques, météo, terrain doit permettre d'apporter un outil pertinent pour la prévention des risques naturels, par exemple dans le cadre des plans de prévention des collectivités locales.

## Applications

La métrologie environnementale est à intégrer aux systèmes d'aide à la décision industrielle et politique.

Dans le premier cas, il s'agit de disposer d'un outil de contrôle permettant l'optimisation des procédés industriels, l'atteinte des objectifs en termes de développe-

ment durable. De nombreuses filières sont concernées : chimie, transport...

Dans le second, il s'agit de disposer de la connaissance nécessaire à la prise de décision : orientations réglementaires dans le domaine des transports, des productions agricoles, du bâtiment, de l'assainissement..., prévention des milieux naturels et de la biodiversité.

Tous types de pollutions sont concernés, tant l'air, l'eau que les sols.

Les différents marchés de la métrologie n'en sont pas au même degré de maturité :

- celui de l'analyse de l'air est mature ;
- le marché de l'analyse de l'eau douce et de la qualité des eaux marines est en croissance ;
- celui des sols est en émergence.

## Enjeux et impacts

Le marché des capteurs et de la métrologie reste très lié à la réglementation. Si cette dernière se renforce, les besoins en instrumentation croissent car les seuils de pollution tolérés sont amenés à diminuer, de nouvelles substances doivent être détectées...



### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

Les enjeux sont divers : environnement bien sûr, mais aussi santé publique et préservation des milieux naturels et de la biodiversité. Ils se traduisent par des réglementations à plusieurs niveaux :

- au niveau français : les objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement ;
- au niveau européen : on cite par exemple la directive cadre sur l'eau qui vise le bon état écologique des eaux (cours d'eau, nappes phréatiques...) à l'horizon 2015. Elle permet de passer à une logique de résultats, l'objectif étant la protection à long terme de la qualité des eaux ;
- au niveau mondial : la Convention sur la diversité biologique (CDB).

La diminution du prix des capteurs permettrait leur généralisation. La mesure en temps réel permettra le suivi des substances émergentes et par conséquent une meilleure appréhension de leur devenir et de leurs effets sur la santé et l'environnement, notamment les effets cumulatifs (exposition sur une longue période).

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA LETI, Cemagref, BRGM, Ineris, Laboratoire Femto, Inria, ISPL (Institut Pierre Simon Laplace), LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air), QQAI (Observatoire de la qualité de l'air intérieur), Laboratoire National d'Essais (LNE), Anjou Recherche (Veolia), Ifremer
- **Intégrateurs** : Iris Instruments, Essaimages du CEA LETI, Environnement S.A, Léosphère, Force-A (issue du CNRS Saclay)
- **Utilisateurs** : Degrémont (Suez), Guigues Environnement
- **Pôles de compétitivité** : Dream22 Eaux et milieux, pôle Risques, pôles MER Paca et Bretagne, Axelera

### Principaux acteurs étrangers

- Environmental Sensors Co., Massachusetts Institute of Technology

## Position de la France

De manière générale, le marché de la métrologie est porté par des PME. La France possède de nombreuses compétences notamment appliquées à l'air et sur les applications satellitaires. Des entreprises françaises sont très bien positionnées à l'export dans le domaine de la qualité de l'air intérieur et sont les leaders technologiques sur les outils de mesure dans ce domaine.

Toutefois, globalement, toutes matrices confondues, la France accuse un retard par rapport aux Etats-Unis, au Japon et à l'Allemagne, leaders dans le domaine.

Il y a un réel enjeu à l'export, certaines PME françaises réalisant de 50 à 70 % de leur chiffre d'affaire à l'étranger (plus de 35 % en moyenne). En effet, les marchés des nouveaux pays membres de l'Union européenne, les pays émergents et les pays en développement sont, à ce jour, inexploités.

## Analyse AFOM

### Atouts

Fort potentiel de recherche et d'innovation, recherche publique de premier plan et nombreux pôles de compétitivité sur lesquels s'appuyer.

### Faiblesses

Marché peu structuré avec pléthore de PME.

### Opportunités

Contexte politique, réglementaire favorable, marchés inexploités à l'étranger : nouveaux pays membres de l'UE, pays émergents, pays en développement, marché favorable au développement de partenariats-contrats à long terme, intégration, en plus de la fourniture des biens, d'une multitude de services.

### Menaces

Concurrence forte des Japonais et des Américains pour la mesure satellitaire.

## Recommandations

Les recommandations pour le développement et la diffusion de ces technologies concernent :

- à la fois, la nécessité de recherches en amont notamment sur les biomarqueurs ;
  - le besoin de mise en réseau des acteurs, avec une difficulté liée à la confidentialité des données traitées ; il manque en France un organisme de représentation collective de la filière « métrologie-instrumentation » ;
  - des actions à mener pour favoriser le transfert de technologies : s'appuyer sur le potentiel de recherche fort sur le sujet et profiter des investissements d'avenir sont des axes pouvant permettre de remédier à cette difficulté.
- En termes de dimension sociale, la communication autour des polluants émergents pourrait produire peur et affolement si elle était mal maîtrisée.

## Liens avec d'autres technologies clés

8

28

83

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input checked="" type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 32. Technologies pour le dessalement de l'eau à faible charge énergétique

### Définitions

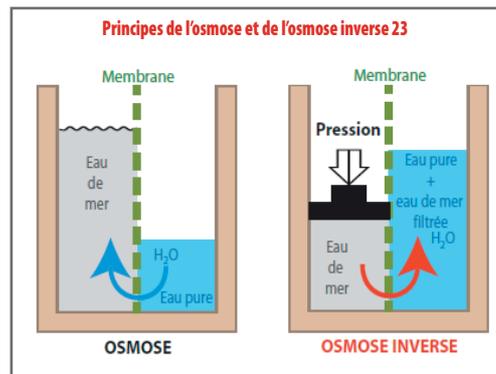
Dans le procédé d'osmose classique, deux solutions de salinité différente sont séparées par une membrane sélective (qui ne laisse passer que certains éléments) : l'eau passe spontanément de la solution la moins concentrée en sel à la plus concentrée, de manière à équilibrer les concentrations de part et d'autre de la membrane.

L'osmose inverse consiste à appliquer une pression à l'eau salée située dans le premier compartiment : l'eau passe alors à travers une membrane mais pas le sel. De l'eau douce est donc obtenue dans l'autre compartiment. L'eau salée doit être prétraitée afin d'éliminer le sable et les particules en suspension, susceptibles de colmater les membranes.

### Description

Deux technologies sont principalement mises en œuvre pour dessaler l'eau de mer : l'osmose inverse et la distillation.

60 % des installations utilisent la technologie de l'osmose inverse.



Dans le cas de la distillation, plusieurs procédés peuvent être mis en œuvre. Le procédé le moins énergivore est la distillation multi-effet pour lequel le distillateur est constitué de plusieurs évaporateurs appelés effets. On trouve aussi des procédés de distillation par dépression, utilisant le fait que la température d'ébullition d'un liquide diminue aux basses pressions.

D'autres technologies sont à l'étude mais n'ont pas encore dépassé le stade des essais en laboratoire. Elles font appel aux nanotechnologies et plus précisément à des nano-membranes constituées de nanotubes de carbone. Cependant, le développement de ces technologies, outre le passage à l'échelle industrielle, nécessite l'approfondissement des connaissances quant à l'impact éventuel des nanotechnologies sur la santé humaine et l'environnement.

Les progrès attendus concernent principalement deux axes :

- la diminution, de 30 à 50 %, de la consommation énergétique de ces technologies (chauffage de l'eau, compression de l'eau salée) ;
- l'atténuation de leur impact. En effet, il en résulte une forte concentration en sel et la question se pose quant à l'utilisation et à l'élimination de ce sel.

### Applications

En raison de la démographie croissante de certaines régions du globe et de l'accroissement des phénomènes climatiques extrêmes (sécheresses ou inondations), la potabilisation de l'eau est devenu un enjeu vital et la désalinisation de l'eau de mer, une solution envisagée

dans un nombre croissant de pays. En effet, 71 % de la surface de la planète est recouvert d'eau, mais 97 % de cette eau est salée [23, 24].

La Banque mondiale estime à 80 pays, soit 40 % de la population mondiale, le nombre de pays souffrant de pénuries d'eau.

De nombreux pays du pourtour méditerranéen ont fait des investissements majeurs dans ce domaine : Espagne, Lybie, Israël, Algérie..., ainsi que des pays du Golfe (Koweït, Arabie Saoudite), la Chine, l'Inde, la Californie, l'Australie...

La Chine représente 20 % de la population mondiale mais ne possède que 7 % des ressources en eau douce de la planète. Le dessalement est donc devenu une solution opérationnelle et stratégique pour le gouvernement central chinois, qui étudie la possibilité de dessaler des glaces de mer (la jeune glace de mer peut emprisonner jusqu'à 22 grammes de sels par litre, moins que la salinité moyenne des océans, de l'ordre de 35 g /L) [25].

### Enjeux et impacts

Fin 2006, la capacité mondiale de dessalement s'élevait à 43 millions de m<sup>3</sup> par jour ; 1 % de la population mondiale dans le monde avait recours à de l'eau issue du dessalement. L'installation d'unités de capacité importante (de l'ordre de 0,001 km<sup>3</sup>) devrait se multiplier dans les mois et années à venir : par exemple, en mai 2010, un consortium israélien (H2ID) a inauguré l'une des plus grandes usines de dessalement du monde dans la ville côtière de Hadera [27]. Le pays est en effet victime de pénuries chroniques d'eau. L'usine devrait fournir, selon le consortium, 127 millions de m<sup>3</sup> d'eau dessalée par an, soit 20 % de la consommation domestique annuelle.

L'osmose inverse devrait atteindre 70 % de part de marché à l'horizon 2020, contre 20 % pour le thermique et 10 % pour les autres méthodes [23]. Les efforts de R&D des leaders mondiaux sont d'ailleurs centrés sur l'osmose inverse.

L'enjeu pour le développement de ces technologies est la réduction des coûts opérationnels du dessalement. Il est actuellement plus simple et moins onéreux de chercher des sources d'eau douce à traiter, dans les pays où cela est possible, que de dessaler l'eau de mer. En revanche, dans les pays ne disposant pas de ressources naturelles en eau douce ou ayant des ressources insuffisantes, le dessalement est mis en œuvre, à condition que le pays en ait les moyens.

L'osmose inverse a permis de considérablement diminuer l'énergie consommée par ces technologies : de 15 kWh/m<sup>3</sup> pour la distillation multi-effet à 4-5 kWh/m<sup>3</sup> pour l'osmose inverse. Mais la part de l'énergie

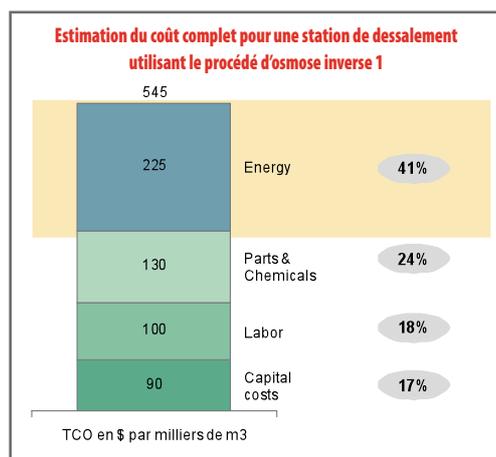
#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

dans le coût total reste importante : plus de 40 % pour l'osmose inverse, portant le prix de l'eau en sortie d'usine entre 0,4 et 0,8 euro le m<sup>3</sup> pour cette technologie [26]. Les travaux dans ce sens doivent être poursuivis.



La réduction des coûts opérationnels permettrait donc d'augmenter la pénétration de ces technologies sur le marché et notamment de rendre le dessalement compétitif par rapport au prélèvement d'eau traditionnel, dans les pays développés ne connaissant pas de problèmes de ressources en eau douce. Dans les pays émergents, l'enjeu se situe dans l'accession à des technologies bon marché.

Dans ce cadre, la capacité mondiale de dessalement pourrait atteindre 107 millions de m<sup>3</sup> par jour fin 2016 [23]. Le marché est important au Moyen-Orient, en Méditerranée et en Asie.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : IEM (Institut européen des membranes, Montpellier), CEA, GRETh (Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques)
- **Utilisateurs** : Veolia, Suez, Saur
- **Pôle de compétitivité** : EAU (Montpellier), Agences de l'eau

### Principaux acteurs étrangers

- General Electric, Doosan, Hyflux, Fisia, Befesa, Kopf

## Position de la France

Les deux leaders mondiaux de l'eau, français, Veolia et Suez (Degrémont), maîtrisent les technologies de l'osmose inverse (mais aussi bien sûr la distillation). Il y a un réel enjeu à l'export pour ces grands groupes sur ces technologies.

La France possède également des laboratoires publics de premier plan dans le domaine des technologies membranaires.

## Analyse AFOM

### Atouts

Les deux leaders mondiaux de l'eau sont français, maîtrisent la technologie et ont les ressources nécessaires à la R&D.

### Faiblesses

Offre trop orientée vers le « clés en mains », pas assez de positionnement sur les équipements.

### Opportunités

Marché en croissance, tiré par la croissance démographique et le stress hydrique, migration vers les zones littorales.

### Menaces

Concurrence de plus en plus forte des pays asiatiques notamment, qui progressent vite et ont une R&D active.

## Recommandations

Le marché potentiel de ces technologies est à l'export, du moins tant qu'elles ne seront pas compétitives avec les technologies classiques de potabilisation. Des travaux de recherche permettraient d'atténuer l'impact environnemental de ces méthodes, notamment sur leurs rejets salés. Lever ce verrou technologique est un enjeu fort pour le développement de ces technologies.

Les enjeux étant à l'export, il conviendrait de renforcer la force commerciale (via la formation notamment) de nos champions nationaux de manière spécifique pour ces marchés.

## Liens avec d'autres technologies clés

33

36

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 33. Technologies pour le traitement des polluants émergents de l'eau

### Définitions

Les polluants prioritaires sont les pesticides (alachlore, atrazine, diuron...), les dioxines, les métaux lourds (cadmium, mercure, nickel, plomb), les HAP (fluoranthène, benzo(a)pyrène, et le benzo(k)fluoranthène.

### Description

Trente-trois substances (et groupes de substances) ont été définies comme dangereuses et nocives et classées comme polluants prioritaires de l'eau depuis plusieurs années.

Plus récemment, l'attention a été attirée sur de nouveaux polluants, dits « émergents », comme les produits pharmaceutiques (antibiotiques...) et cosmétiques, les plastifiants. La question des perturbateurs endocriniens est particulièrement préoccupante.

Les procédés classiques de traitement de l'eau permettent de traiter en partie ces polluants émergents :

- les procédés membranaires : ultra et nanofiltration. Certains procédés combinent mécanisme physique de rétention des polluants et mécanismes biologiques de dégradation par voie aérobie (réaction d'oxydation exothermiques des composés en présence d'oxygène et de micro-organismes conduisant à la formation de biomasse, d'eau et de produits minéraux) ;
- les procédés de dégradation biologique anaérobiques conduisant à la production de méthane ;
- les procédés d'oxydation chimiques avancés, permettant de dégrader les polluants en des produits finaux inorganiques, de l'eau et du dioxyde de carbone ;
- les traitements UV/ozone.

Les verrous restant à lever sont de plusieurs types :

- la mise au point de technologies de détection fiables, reproductibles, prenant en compte les effets cumulatifs des polluants émergents ;
- des innovations incrémentales portant sur l'amélioration des technologies membranaires classiques afin d'augmenter les performances des membranes (problèmes de colmatage, performances énergétiques) ;
- des innovations de rupture avec le développement de technologies émergentes à moyen et long terme : nanotechnologies (filtre à base de nanotubes de carbone par exemple) et des biotechnologies (phytoremédiation). Elles permettraient d'augmenter la quantité des composés enlevés en stations d'épuration (STEPs) et de traiter ces polluants et leurs métabolites ;
- la nécessité de trouver de nouvelles combinaisons de traitements : recourir à plusieurs procédés combinés rend le traitement plus efficace. Un certain savoir-faire est nécessaire pour trouver la meilleure association ;
- l'optimisation économique de ces solutions : réduction du coût des membranes, la technologie UV/ozone est onéreuse...

### Applications

Les applications de ces technologies concernent :

- la production d'eau potable ;
- le traitement de l'eau pour l'industrie ;
- le traitement des eaux usées : domestiques mais aussi effluents industriels.

Le marché de l'eau est globalement mature en Europe et connaît une croissance faible, de 2 à 3 % par an. L'amélioration des installations est continue, mais l'impact en termes d'emplois nouveaux est restreint.

Par contre, la croissance est beaucoup plus forte en Chine et au Moyen-Orient : de l'ordre de 10 % par an.

Il y a des opportunités de contrats d'exploitation avec les municipalités et des industriels, les municipalités représentant les marchés les plus importants. Au niveau mondial, le marché de l'exploitation municipale (O&M, gestion des actifs, internalisation municipale) représentait en 2007, tous segments confondus (distribution de l'eau/collecte eaux usées, traitement de l'eau, traitement des eaux usées), 170 000 Md\$.

Le marché municipal mondial des composants (produits chimiques, filtration et traitement) pour le traitement de l'eau et des eaux usées représentait 23 000 Md\$ en 2007, et 22 000 Md\$ pour les industries.

### Enjeux et impacts

L'enjeu du traitement des polluants émergents est un enjeu économique mais aussi de santé publique. En effet, contrairement aux polluants prioritaires, les polluants émergents ne sont pas tous identifiés, tant en termes de structure que d'impact sanitaire et environnemental. Ils sont aussi présents à faibles concentrations dans l'eau, ce qui les rend difficiles à atteindre (par les micro-organismes des STEP conventionnelles par exemple). Certains de ces polluants présentent une faible dégradabilité biologique, d'autres au contraire sont dégradés en molécules plus toxiques que la molécule mère. Environ 90 % de ces composés peuvent être enlevés dans les STEP mais il en reste tout de même dans les effluents à des concentrations de l'ordre du nanogramme par litre. Or, les effets cumulatifs de ces polluants sont méconnus. Enfin, leur émission dans l'environnement est continue.

Trois directives principales tirent le marché de l'eau :

- la directive cadre sur l'eau vise l'atteinte d'un bon état écologique des eaux et des milieux aquatiques (nappes phréatiques comprises) à l'horizon 2015 ;
- le plan PNSE 229 ;
- le Grenelle de l'environnement.

Une filière de l'élimination des déchets médicamenteux est à créer afin d'éliminer une partie de la pollution à la source.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Onema, IEM (Institut européen des membranes), Cemagref, LCME, Enges, Anses, LPTC
- **Utilisateurs** : Veolia, Suez, Saur (dont Stereau), Hydranet, Degremont, Syndicat national des industries de production d'eaux potables, de process et de piscines (Siep)
- Le pôle Hydreos (Lorraine-Alsace) qui traite de la gestion du cycle de l'eau (qualité, santé, écosystèmes et maîtrise des polluants) ainsi que le pôle Dream Eau & Milieux28 devront travailler en coordination avec le pôle à vocation mondiale Eau (ressources en eau : localisation, extraction, gestion rationnelle et assainissement). Pôle Axelera

### Principaux acteurs étrangers

- Nalco, ITT, Tyco, Siemens, GE

## Position de la France

La France compte trois leaders mondiaux, Veolia (12,3 Md€ de chiffre d'affaires pour l'activité de l'eau), Suez (6 Md€ de chiffre d'affaires pour l'activité de l'eau) et Saur dans le domaine de l'eau. Ceux-ci sont présents sur les technologies clés (filtration membranaire, osmose inverse...) c'est-à-dire sur l'ingénierie, mais sont absents sur les équipements et les produits chimiques [3].

Le leadership a été acquis grâce à l'action publique et la mise en place de la délégation de service public (DSP). C'est ce qui a permis la structuration de la filière et la création d'entreprises de taille suffisante pour avoir une R&D active, une capacité d'exportation du savoir-faire et un fort dynamisme.

Le modèle mixte public-privé français est considéré comme une référence dans le monde, et permet de préserver nos champions nationaux ainsi que leur puissance à l'export.

## Analyse AFOM

### Atouts

Trois leaders mondiaux français ; des pôles de compétitivité positionnés sur ces thématiques, avec la labellisation récente de trois pôles écotechs en rapport avec l'eau.

### Faiblesses

En ingénierie de projet, (nombreuses entreprises de petite taille, à faible dimension internationale).

### Opportunités

Contexte réglementaire favorable (Grenelle de l'environnement, directive de l'Union européenne...). Opportunités aussi dans des pays d'Asie (Inde, Chine).

### Menaces

Développement très rapide des compétences en Asie (Chine, Corée).

## Liens avec d'autres technologies clés

30

35

## Recommandations

Il conviendrait dans le cadre d'appel à projet de recherche de mobiliser l'industrie pharmaceutique pour caractériser au mieux la biodégradabilité des polluants émergents dont elle est la source.

L'axe « écotoxicologie » portée par la SNRI devrait faire l'objet d'actions spécifiques dans le cadre des investissements d'avenir permettant de doter la recherche française des outils adaptés pour répondre aux enjeux de santé publique et sanitaires soulevés ici.

Par ailleurs, on note un réel besoin de structuration de la filière autour des pôles de compétitivité et industries concernés.

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



## 34. Technologies pour le traitement de l'air

### Définitions

Parmi les polluants primaires, certains ont une importance particulière : le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote (NOx), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les particules et les composés organiques volatils (COV).

L'ozone est le principal polluant secondaire rencontré : un processus photochimique transforme certains polluants primaires (COV, NOx, monoxyde de carbone) en ozone. L'acide sulfurique et l'acide nitrique sont aussi des polluants secondaires.

### Description

La pollution de l'air a plusieurs sources : l'industrie, les matériaux de construction et de décoration (bâtiment), les cheminées domestiques, les transports, l'agriculture, etc.

On distingue plusieurs types de polluants de l'air :

- les polluants primaires chimiques : substances présentes dans l'atmosphère telles qu'elles ont été émises ;
- les polluants secondaires chimiques, dont la présence dans l'atmosphère résulte de réactions chimiques entre des composés précurseurs ;
- les substances d'origine biologique (moisissures, bactéries, allergènes...).

Ces différents types de substances nécessitent des technologies de traitement différentes. De fait, les technologies de traitement de l'air sont variées :

- les technologies « classiques » de filtration : l'air passe au travers d'un filtre qui retient les polluants ;
- l'adsorption : transfert et interactions des composés polluants avec la surface d'un matériau poreux. Cette technique peut être couplée à une réaction chimique de type ozonation (par exemple pour le traitement sélectif des COV de fumées industrielles) ;
- la photocatalyse [22] : cette technologie demeure pour l'instant assez confidentielle et fait débat quant à son potentiel réel, notamment à grande échelle.

La faisabilité technique de ces types de technologies est déjà démontrée il subsiste toutefois des verrous technologiques à lever :

- en amont, le développement de la métrologie appliquée à la qualité de l'air ;
- l'amélioration des catalyseurs utilisés en photocatalyse, permettant la réduction de la taille des réacteurs et de la consommation énergétique de cette technologie ;
- l'obtention de systèmes fiables, simples, peu onéreux aussi bien de mesure (métrologie) que de traitement.

Au-delà des verrous purement technologiques, il existe aussi des actions à mener en amont. La réduction des émissions « à la source » est indispensable et indissociable d'un bon résultat en matière de qualité de l'air. Les actions de prévention passent par des réflexions engagées dans plusieurs secteurs : meilleure conception des matériaux de construction et de décoration, re-conception des systèmes de circulation de l'air, revêtements des routes dépolluants dans le secteur des transports, systèmes de post traitement pour l'automobile, limitation des rejets gazeux engendrés par la synthèse des nanotubes de carbone dans le cas des nanotechnologies, poursuite des efforts en matière d'émissions industrielles...



### Applications

De manière générale, le marché du traitement de l'air est un marché mature en France. Il regroupe les fumées industrielles d'une part, et la qualité de l'air intérieur d'autre part.

En matière de fumées industrielles, les investissements seront fortement portés jusqu'en 2012 (12 Md€/an) par la nécessaire mise en conformité des installations aux normes européennes, notamment en Europe centrale. Le marché de la concession est lui aussi évalué à plus de 12 Md€/an à l'horizon 2015. Mais le marché du traitement des fumées industrielles est consolidé autour de grands groupes et peu ouvert aux nouveaux entrants.

En matière de qualité de l'air intérieur (QAI), il y a par contre des opportunités intéressantes pour des PME spécialisées.

En effet, la taille de ce marché est plus modeste que celle du traitement des fumées industrielles mais il est en forte croissance en raison des enjeux de santé publique. Le modèle américain en matière de QAI, qui a permis une croissance de 10 % par an pour ce marché, laisse entrevoir des perspectives plus qu'intéressantes sur notre territoire.

En 2007, le marché de la qualité de l'air intérieur représentait, en France, 1,3 Md€, principalement lié aux équipements de ventilation des bâtiments (VMC) et aux équipements de mesure et de contrôle. Une croissance de 10 % par an est attendue d'ici 2020, ce qui représenterait alors 4 Md\$ : 1 Md\$ pour les services de mesure et de diagnostic porté par des PME ; le reste se partageant entre les équipements pour la ventilation, les filtres, le dépoussiérage, les services d'installation et de maintenance...

### Enjeux et impacts

En matière de qualité de l'air, l'enjeu principal concerne la santé publique et l'environnement. En effet, les polluants de l'air intérieur peuvent causer de nombreux problèmes de santé, allant de problèmes respiratoires ou allergiques à des infections, voire même, dans les cas les plus sévères, des cancers.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

Plusieurs directives européennes et lois ou décrets français réglementent ce domaine. Parmi ces textes, la stratégie thématique européenne fixait, en 2005, des objectifs à long terme pour 2020 tels que la réduction de 47 % de la perte d'espérance de vie du fait de l'exposition aux particules, de 10 % des cas de mortalité aigüe dus à l'ozone, de 43 % les zones où les écosystèmes sont soumis à l'eutrophisation.

Le plan PNSE 2 a été mis en place pour la période 2009-2013 et vise la réduction de 30 % des émissions de particules fines dans l'air ainsi que la diminution des émissions de six substances toxiques (mercure, arsenic, HAP, benzène, perchloroéthylène, PCB/dioxines). Il réaffirme la mise en place de l'étiquetage sanitaire des produits de construction, de décoration et plus généralement des produits les plus émetteurs de substances dans l'air intérieur des bâtiments et rend obligatoire l'utilisation des matériaux les moins émissifs dans les écoles et les crèches. Une campagne de surveillance de la qualité de l'air a d'ailleurs été lancée à la rentrée 2009 dans 300 crèches et écoles (150 en 2009-2010 et seconde phase en 2010-2011) [29].

Pour le secteur du bâtiment notamment, un des enjeux réside aussi dans l'acceptabilité des constructeurs, dans l'information et l'éducation des utilisateurs. Le plan PNSE 2 prévoit notamment de développer des conseillers en « habitat santé » ou en « environnement intérieur » pouvant se rendre au domicile des personnes souffrant de certaines maladies afin de leur proposer des mesures ciblées destinées à améliorer leur environnement de vie. Il y a donc des opportunités intéressantes pour des PME spécialisées.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CSTB, Ademe, Ineris, LCSQA (Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air), QQAI (Observatoire de la qualité de l'air intérieur)
- **Intégrateurs** : Sansaris, Exotec, Icare, Bertin Environnement, Stereau, Delta Neu, société Ethera, Guigues Environnement, Epurae, Europe environnement, Air Sûr, Phytorestore, Saint Gobain, Veolia, Bouygues, Vinci, Colas, Eurovia, Alstom...
- Pôle Axelera

### Principaux acteurs étrangers

- Marsulex, Hamon, Lurgi, AEE, Babcock-Hitachi, Von Roll, MHI, IHI, Rafako, Procedair, GE, KHI...

## Position de la France

Sur le traitement de l'air en général, la France et l'Europe sont plutôt en avance. Les acteurs de la recherche publique sont nombreux, de même que les entreprises à même de proposer des solutions de surveillance et de traitement des pollutions.

## Analyse AFOM

### Atouts

Nombreux acteurs de R&D, prise de conscience collective des enjeux de la qualité de l'eau intérieure (QAI).

### Faiblesses

Un seul grand groupe français parmi les principaux installateurs de systèmes de traitement des fumées industrielles.

### Opportunités

Contexte réglementaire et sociétal, marchés publics.

### Menaces

Marché consolidé autour de grands groupes et peu de place pour les nouveaux entrants (volet industriel).

## Recommandations

En termes de dimension sociale, il conviendrait de s'inspirer de ce qui a été fait aux États-Unis où un grand programme national en faveur de la QAI (doté d'un budget de 40 millions de dollars) a permis de mettre en place des campagnes de sensibilisation des particuliers aux risques liés aux différents polluants, de créer un label pour les équipements performants, de créer un programme spécifique dans les écoles, de mettre en place des programmes de recherche spécifiques par type de polluants et de financer ces différents projets.

Il est recommandé également une évaluation multicritère des technologies décrites dans le cadre d'une approche systémique de la protection de l'environnement.

Enfin, la diffusion de ces technologies passera aussi par une prise en compte de ces questions dans les marchés lancés par les collectivités pour les bâtiments publics (écoles...).

## Liens avec d'autres technologies clés

41

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



# 35. Technologies pour la dépollution *in situ* des sols et des sites pollués

## Définitions

**Venting** : injection d'air dans le sol pour faire remonter les polluants et les aspirer. **Bioventing** : venting couplé avec l'injection de bactéries ou nutriments qui décomposent biologiquement les polluants, et ceux-ci sont ensuite aspirés, sans destruction du sol.

**Biotechnologies** : biodégradation, bio-réduction, biolixiviation (métaux du sol extraits par solubilisation, grâce à des micro-organismes), bio-fixation/bio-sorption (fixation des polluants métalliques d'un effluent liquide sur des micro-organismes).

Certaines approches novatrices (*In Situ Chemical Reduction*) couplent la biodégradation avec un changement drastique des conditions physico-chimiques du milieu, en particulier pour des polluants organiques persistants.

## Description

La pollution des sols a plusieurs origines : activités industrielles, minières ou agricoles, de natures chroniques ou accidentelles. Il convient de bien différencier les pollutions ponctuelles (majoritairement industrielles ou accidentelles) des pollutions diffuses (majoritairement agricoles, liées aux transports ou issues de rejets atmosphériques chroniques).

Le marché de la dépollution reste dominé par les techniques *ex situ* (en particulier excavation-mise en décharge ou excavation-biocentre). L'un des principaux inconvénients sur le plan environnemental des techniques *ex situ* est la nécessité de transporter des quantités importantes de sols pollués. Les techniques de dépollution sur site permettent de s'affranchir de cet inconvénient. En outre, dès que les quantités de sols pollués mises en jeu deviennent importantes, le bénéfice environnemental des techniques *in situ* s'ajoute au gain économique par réduction des frais de transport. Pour ces raisons, ces techniques font l'objet d'importants efforts de R&D et de démonstration. Néanmoins, elles peinent à accéder au marché.

À ce jour, les techniques sur site les plus matures sont :

- la *venting* et la *bioventing* (voir encadré) ;
- les biotechnologies (voir encadré) ;
- la phytoextraction : les polluants (métaux principalement) sont extraits du sol via des végétaux (technologie émergente) ;
- la phytostabilisation (stabilisation par des végétaux) ;
- le confinement : la pollution ne peut donc plus migrer mais elle n'est pas traitée ;
- les techniques de traitement thermique (désorption thermique) ;
- la stabilisation physico-chimique ;
- l'oxydation chimique.

Pour contribuer au développement et au déploiement de ces technologies, les efforts à mettre en œuvre pour lever les verrous sont :

- baisse de la consommation d'énergie pour la désorption thermique par pointe chauffante ;
- couplage de l'oxydation et de la réduction chimiques avec la biodégradation ;
- développement de technologies de gestion des pollutions combinées (à la fois organiques et métalliques). Il faut alors stabiliser les polluants métalliques avant de pouvoir biodégrader les polluants organiques ;
- développement de technologies de remédiation des polluants organiques très persistants, tel que le chlorodécone (pesticide).

En complément des développements technologiques, il est essentiel de développer des méthodologies d'éva-

luation globale des performances techniques, économiques et environnementales

De manière générale, les techniques de traitement *in situ* ne sont pas assez développées, victimes de freins :

- techniques : typologie de la pollution, limites d'application des techniques, manques de connaissance de la pollution ;
- organisationnels : responsabilité résiduelle, nuisances et délais, contraintes temporelles, acceptabilité, contexte économique et juridique...

## Applications

En France, la base de données Basol [34] permet de connaître les sites et sols pollués (ou potentiellement pollués) appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventifs ou curatifs ; les sites industriels faisant l'objet d'actions régaliennes sont d'environ 4 000.

En 2006, 54 % du traitement des sols a été effectué hors site : 17 % dans des installations de traitement biologique, presque 30 % dans des centres de stockage de déchets. Les traitements *in situ* représentaient 26 % des tonnages : la méthode la plus répandue était le *venting/bioventing*.

Le marché annuel de dépollution des sols devrait représenter 2,6 milliards d'euros en 2020 [1] soit une augmentation de 9,5 % par an. Il représentait 889 millions d'euros en 2008 et 8 400 emplois dont 2 400 directs. Le nombre d'emplois total en 2020 devrait avoisiner les 25 000 dont 6 000 directs. Cette estimation se base sur le maintien d'une réglementation stricte, un marché du BTP équivalent au marché des travaux, et envisage le développement de trois fonds d'investissements de 100 millions d'euros chacun d'ici à 2020 [1].

## Enjeux et impacts

La pollution des sols peut avoir un impact sur la santé publique et la qualité des eaux souterraines et de surface, sur une échelle de temps plus ou moins importante. À court ou moyen terme, le risque concerne les eaux souterraines, superficielles et les écosystèmes. Les risques pour la santé résultant généralement d'une exposition



### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

longue durée aux substances toxiques, l'impact sur les populations se mesure à moyen et long terme.

Au-delà du réaménagement des sites, le durcissement de la réglementation (sur les sols eux-mêmes mais aussi la directive-cadre sur l'eau pour ce qui concerne l'état des nappes souterraines) constitue un des moteurs du marché en France. De par l'origine industrielle de la pollution, la législation relative aux installations classées est la réglementation la plus souvent utilisée pour traiter les situations correspondantes.

Deux autres éléments de contexte expliquent la tendance à la hausse de ce marché de la dépollution des sols et des sites : la pression immobilière et le contexte industriel. En effet, les fermetures de sites industriels se sont multipliées en raison des phénomènes de délocalisations et désindustrialisation. Le traitement de ces sites est donc un marché supplémentaire potentiel.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Ademe, BRGM, IFP, Ineris, IRSN
- **Ingénierie** : Burgeap, Bureau Veritas, Antea, ERG Environnement, Environ France SAS, Guigues Environnement, Socotec, Dekra, Sogreah, Tauw...
- **Entreprises de travaux** : Extract-Ecoterres, Sita Remediation (Suez), GRS Valtech (Veolia), Idra-Environnement, Valgo, Colas Environnement, Serpol, Seché Eco-Services, Sol Environnement, Soleo Services, Biogénie, Cosson, Ikos, OGD (groupe Ortec), Brézillon, Apinor...
- Union Professionnelle des entreprises de Dépollution de Sites (UPDS)
- Pôle Team2, programme européen Eurodermo, pôle Dream Eau & Millieux, Axelera

### Principaux acteurs étrangers

- **Ingénierie** : Tauw, Arcadis, URS, ERM, CSD Azur...
- **Entreprises de travaux** : Biogénie Europe SAS, HPC Envirotec...

## Position de la France

Le leader européen est français : il s'agit de Sita Remédiation.

Le marché français a été pénétré depuis 2002 par des entreprises étrangères, allemandes et hollandaises principalement.

Ce sont essentiellement les grands groupes qui peuvent élargir leur activité à l'international. En revanche, sur le territoire, l'offre des entreprises évolue et les petites structures intègrent de plus en plus la maîtrise d'ouvrage.

Le tissu de recherche académique français est reconnu au niveau international.

## Analyse AFOM

### Atouts

Le tissu de recherche français, une avance d'un point de vue réglementaire qui permet à la France d'être positionnée dans le peloton de tête en termes de bonnes pratiques.

### Faiblesses

Difficulté dans le transfert de technologies et le passage au stade industriel et contexte géologique.

### Opportunités

Un label de qualité, Qualipol, a été créé pour compléter la norme de service NF X31-620 sur les prestations de services relatives aux sites et sols pollués. Ce label permet aux entreprises de dépollution de se démarquer des entreprises de démolition et de terrassement. Un groupe de travail, conduit par le MEDDTL, travaille actuellement sur une révision de cette norme et sur une certification ; le contexte est favorable : réglementation, pression immobilière ; les friches industrielles de plus en plus nombreuses dans l'ensemble de l'Europe ; la question de la gestion des sites pollués devrait aussi se poser en Chine et en Inde.

### Menaces

Marché non solvable.

## Liens avec d'autres technologies clés

30

37

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort

## Recommandations

L'offre de recherche française est conséquente ; toutefois, le transfert de technologies est difficile. Il s'agit de trouver des leviers permettant de faciliter cette étape clé.

La mise au point de méthodes basées sur la phytoextraction nécessite de longues phases expérimentales qu'il pourrait être intéressant d'intégrer à des projets de recherche spécifiques (APR ANR par exemple). Ceci permettrait de faciliter le déploiement des phytotechnologies sur site (technologies encore expérimentales pour l'instant).





## 36. Technologies pour la gestion des ressources en eau

### Définitions

La réalimentation des nappes phréatiques peut être combinée au pouvoir épuratoire des sols grâce à la filtration sur berge (procédé naturel de filtration de l'eau à travers les différentes couches de sédiments qui constituent les berges d'une rivière ou d'un lac). Empreinte sur l'eau : représente le volume d'eau nécessaire pour la production des biens et services consommés par les habitants du pays considéré.

En 2007, 31,6 milliards de m<sup>3</sup> d'eau ont été prélevés en France, répartis de la manière suivante :

- 59 % : production d'énergie
  - 10 % : besoins de l'industrie
  - 12 % : l'irrigation
  - 18 % : eau potable
- provenant à 18 % des eaux souterraines et à 82 % des eaux de surface.

### Description

Par gestion des ressources en eau on entend la protection des ressources et la gestion du cycle de l'eau, de manière préventive. Cette gestion s'effectue aussi bien d'un point de vue quantitatif (suivi dans l'espace et dans le temps, gestion des phénomènes extrêmes) que qualitatif (une qualité de l'eau adaptée à l'usage qui en est fait).

Plusieurs technologies peuvent être mises en œuvre :

- l'apport d'information centralisée (métrologie, modélisation...) permettant de suivre le niveau et la qualité de ces ressources ;
- la réalimentation des nappes phréatiques [38] permettrait de sécuriser les ressources, voire de les développer ;
- l'extraction, le traitement et le recyclage des eaux souterraines polluées qui peut permettre la réhabilitation des nappes ;
- la gestion patrimoniale des réseaux de distribution [37] : par la maintenance, le renouvellement, la gestion des fuites, le choix de nouveaux matériaux...

Les verrous concernent :

- la définition d'un état de référence des masses d'eau et des outils de suivi des nappes (qualité, niveau, salinité...);
- en agriculture, l'apport de l'exacte quantité d'eau nécessaire aux cultures ;
- pour l'industrie, l'enjeu consiste à fournir la bonne qualité pour le bon usage tout en maintenant la sécurité : l'usage d'eau potable n'est pas indispensable pour tous les *process* à condition de veiller au bon état biologique de l'eau employée ;
- l'automatisation des prélèvements d'eau dans les nappes, en fonction de leur niveau ;
- des solutions de réparation et de services associés permettant de cartographier et diagnostiquer les réseaux sans casser. La gestion des fuites nécessite des méthodes de comptage et d'acoustique. L'objectif est d'obtenir des comptages précis et de pouvoir effectuer des relevés facilement. Il y a donc un enjeu sur l'installation et la transmission de données. Dans le domaine de l'acoustique, le problème concerne les bruits parasites qui gênent la détection des fuites.
- l'automatisation et le couplage de ces différents systèmes : mesure-modélisation, prélèvement, suivi de l'état des réseaux.

Les bassins versants côtiers, notamment en zone d'agriculture intensive, doivent être mieux gérés afin d'améliorer la qualité des eaux marines et la santé des écosystèmes, par exemple pour limiter la prolifération des algues vertes.



### Applications

De nombreux segments sont concernés par ces technologies : usines de production, réseaux de distribution, stations d'assainissement, irrigation.

Ainsi, la modélisation peut par exemple permettre de reproduire le fonctionnement naturel des nappes souterraines, d'étudier les mécanismes de formation et de régénération des ressources en eau douce et permettre d'optimiser les prélèvements d'eau.

En 2006, 5,6 Md€ ont été investis pour créer de nouveaux réseaux et de nouvelles installations et pour remettre à niveau les équipements existants [41].

Dans le domaine de l'agriculture, le marché mondial des équipements pour l'irrigation devrait croître de 5 à 10 % par an et représenter 1,5 Md\$ en 2015. Dans le domaine de l'industrie, le marché des systèmes de contrôle de l'eau devrait croître de 12 % par an d'ici à 2015 pour atteindre 3 Md\$. Marché constitué de bureaux d'études et de PME principalement, des opportunités à l'export. Les systèmes de gestion efficace de l'eau représentent une opportunité de croissance à court terme pour les PME françaises.

### Enjeux et impacts

Les enjeux sont d'ordre sanitaire et environnemental. La directive-cadre de l'eau en Europe (DCE) fixe le cadre réglementaire au niveau européen. Le rapport sur l'état des masses d'eau en France, transmis à la Commission européenne le 22 mars 2010 à l'occasion de la Journée mondiale de l'eau, mentionne que plus de la moitié des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, eaux côtières) en France ne sont pas « en bon état écologique » (au regard de la biodiversité animale et végétale, des teneurs en phosphate, nitrates, du pH...) : 38 % sont en état moyen, 11 % en état médiocre et 4 % en mauvais état. 41 % des eaux souterraines ne sont pas en bon état chimique (40 substances chimiques mesurées). Pour des raisons parfois techniques, économiques ou naturelles, les objectifs de la DCE ne pourront pas être atteints pour certaines masses d'eau et certains sites ont de ce fait obtenu une dérogation.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



La préservation des ressources hydriques représente aussi un enjeu sociétal énorme en raison de la pression démographique et des épisodes de sécheresse plus fréquents et ce, même si la France ne manque pas d'eau et que la ressource est globalement bien répartie sur le territoire. La préservation des ressources s'inscrit dans une démarche de développement durable. Les fuites sur nos réseaux sont tout de même estimées à 21 % des volumes en distribution. Le gaspillage doit être évité à l'heure où certaines estimations portent à 39 le pourcentage de la population mondiale qui n'aura pas accès à l'eau en 2030.

Tous les pays n'ont pas la même empreinte sur la ressource en eau. En 2007, elle était de 2 483 m<sup>3</sup> par personne et par an aux États-Unis, de 1 103 m<sup>3</sup> par personne et par an en Pologne et de 675 m<sup>3</sup> par personne et par an seulement en Ethiopie, pour une moyenne mondiale de 1 243 m<sup>3</sup> par personne et par an [40].

L'agriculture mondiale devra produire 50 % de nourriture en plus d'ici à 2030, et doubler la production à l'horizon 2050, tout en consommant moins d'eau en raison des pressions exercées sur les ressources par la croissance de l'urbanisation, les changements climatiques, l'industrialisation.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Onema, Cemagref, Cirad, IFP, IRD, Agro ParisTech, IAM Montpellier, SupAgro Montpellier, Agences de l'eau, Inra, BRGM
- **Utilisateurs** : Veolia Eau, Lyonnaise des eaux (Suez), Saur, Séché Environnement
- **Pôles de compétitivité** : Eau, Hydreos, Dream, pôles Mer PACA et Mer Bretagne

### Principaux acteurs étrangers

- Netafim (micro-irrigation), GE, Siemens, Honeywell, ABB, Emerson, Andover, Control (Schneider)

## Position de la France

Le marché de l'eau (eau potable et assainissement) en France atteint un chiffre d'affaires de plus de 15 milliards d'euros. Avec 112 800 emplois, des activités et services relevant en France principalement de politiques publiques, et une R&D du secteur privé très concentrée, l'eau est l'un des deux secteurs principaux des éco-activités, avec la filière des déchets, et de même importance.

Les deux acteurs internationaux majeurs sont français. Dans le domaine de l'agriculture, Israël est le leader (Netafim leader mondial de la micro-irrigation). Il y a des consortiums européens à monter.

## Analyse AFOM

### Atouts

Des leaders mondiaux français capables d'investir dans la R&D, d'industrialiser et de structurer la filière ; R&D en fort développement dans le secteur privé et une R&D publique de qualité, plusieurs pôles de compétitivité dans le domaine de l'eau.

### Faiblesses

Retard dans l'irrigation, développement ou mise en place insuffisante de la filière de l'assainissement non collectif, peu de R&D sur les réseaux et les services en régie.

### Opportunités

Objectifs du Millénaire pour le Développement (réduction de moitié d'ici à 2015 du pourcentage de la population qui n'a pas d'accès à l'eau potable ni à des services d'assainissement de base ; intégration des principes du développement durable dans les politiques et programmes nationaux afin d'inverser la tendance actuelle de déperdition des ressources naturelles) ; développement des TIC.

### Menaces

Développement très rapide des compétences dans les pays asiatiques (Corée, Chine) ainsi que des investissements importants constituant des démonstrateurs de ces compétences ; non-acceptation de la réutilisation des eaux usées.

## Recommandations

Il est nécessaire de développer et d'orienter la recherche et le développement technologique (R&D), les démonstrateurs à mettre en œuvre aux niveaux national et européen.

Il faut stimuler l'organisation des acteurs et lancer des actions coordonnées au plan national et européen.

## Liens avec d'autres technologies clés

32

### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 37. Technologies pour le recyclage des matériaux rares et leur valorisation

### Définitions

Outre les déchets électroniques, on retrouve ces matériaux rares dans les boues, les effluents, les déchets de raffinage, et dans les alliages.

### Description

L'appellation « matériaux rares » regroupe les métaux rares (titane, cobalt, vanadium, molybdène, tantale, césium, rubidium, tungstène, métaux précieux : or, argent, platine, palladium) et les terres rares. On les retrouve essentiellement dans l'électronique.

Des procédés de recyclage existent mais aucun ne semble complètement développé commercialement. Il s'agit essentiellement de technologies de concentration :

- des technologies aqueuses dont l'inconvénient est de produire des oxydes métalliques mixtes ou des fluorures qui sont ensuite aussi chers à purifier que le minerai original ;
- le raffinement par procédé électro-laitier qui fonctionne bien pour les grandes pièces mais moins pour les déchets contaminés ou se présentant sous forme de copeaux ou de grains. De plus, les métaux de transition se retrouvent fréquemment dans les produits finaux ce qui nécessite une purification ultérieure supplémentaire ;
- l'extraction métallique liquide : procédé prometteur car il accepte les multi-métaux. Le principe est maîtrisé mais il reste maintenant à l'appliquer aux terres rares ;
- le four à pyrolyse permet de séparer les plastiques et métaux composant les cartes électroniques, les métaux ainsi concentrés pouvant par la suite subir différents traitements de séparation, purification.

D'autres procédés expérimentaux sont à l'étude comme par exemple la récupération des oxydes de néodyme, de cérium et de lanthane à partir des déchets de production. Cela permet de recycler les effluents industriels, et de produire du titane et des terres rares avec un taux de récupération variant entre 60 et 80 %. Un procédé de réduction des déchets miniers en nanofractions, d'une taille de 1 000 nm, traitées en solution aqueuse, permettrait de récupérer des matériaux rares présents à des concentrations deux à trois fois inférieures aux taux habituels d'extraction [43].

La faisabilité technique de ce type de technologies est déjà en partie démontrée mais il subsiste de nombreux verrous technologiques à lever :

- les faibles quantités présentes de ces matériaux rares dans les appareils électroniques rendent difficile leur récupération : il est nécessaire perfectionner les techniques de concentration de ces matériaux ;
- des techniques efficaces de séparation doivent permettre de séparer les matériaux rares des alliages qu'ils composent ;
- les technologies existantes présentent généralement soit des problèmes de coûts élevés, soit de faible rendements, voire même les deux et peuvent donc être améliorées dans ce sens ;

• l'obligation pour toute la filière (collecte, tri, traitement) à s'adapter rapidement à la forte instabilité du gisement qui évolue dans le temps.

Les technologies relatives à l'extraction des matériaux rares des déchets sont aussi liées au tri des déchets. Celui-ci constitue une première étape de préparation des déchets, traités ensuite pour en extraire les matériaux rares, en vue de leur valorisation.

En ce sens, l'éco-conception doit aussi permettre de « penser » les produits en amont, de manière à faciliter la récupération des matériaux rares les composant lorsqu'ils arrivent en fin de vie.

### Applications

Les métaux rares sont présents en faible quantité à l'état naturel. Avec les terres rares, ils sont utilisés dans les technologies de pointe (moteurs de voiture, électronique, industrie militaire, nucléaire). Ils sont aussi fortement liés aux technologies vertes, trouvant des applications en catalyse, dans les énergies renouvelables, le stockage de l'énergie, les superalliages...

125 000 tonnes de terres rares sont produites chaque année. Rien que pour les terres rares, la demande augmente de 10 à 20 % par an. Le marché pèse annuellement 1,25 Md\$ et devrait représenter 3 Md\$ en 2015.

Seulement 1 % des métaux utilisés dans ces produits de haute technologie est aujourd'hui recyclé. Pour les métaux non ferreux, la seule récupération des produits en fin de vie assure 20 % des besoins.

### Enjeux et impacts

De par leurs vastes applications, les terres rares représentent une importante ressource stratégique.

La Chine assure 96 % de la production mondiale et en assure un contrôle strict (quotas, taxes d'exportation) pour la réserver à son industrie. Ces quotas se réduisent d'année en année, avec un possible arrêt des exportations pour certaines terres rares à l'horizon 2014-2015. Il n'y a donc pas de risque de pénurie de la ressource en tant que telle mais un risque de pénurie des terres rares disponibles pour les industries consommatrices.

Le recyclage de celles-ci apparaît donc comme un enjeu évident afin de maintenir la sécurité d'approvisionnement de certaines filières françaises, mais aussi européennes et mondiales.

L'extraction dans les gisements connus mais encore non exploités et l'exploration pour en découvrir de nouveaux sont aussi une solution à mettre en œuvre.

Les États-Unis ont inscrit les terres rares dans leur liste des matériaux critiques pour leur industrie high-tech. L'Europe a publié au mois de juin 2010 un rapport qui

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

s'inquiète de pénuries à venir pour quatorze éléments, qualifiés de « critiques » (dont l'approvisionnement pourrait subir l'impact de tensions politiques ou de pénuries). Il s'agit de : antimoine, béryllium, cobalt, fluorine, gallium, germanium, graphite, indium, magnésium, niobium, les platinoïdes (six matériaux dont platine et palladium), terres rares (17 éléments), tantale et tungstène. Un plan d'action pour sécuriser les approvisionnements de l'Hexagone a été présenté le 27 avril 2010. La sécurité de l'approvisionnement passera non seulement par le renforcement des accords avec les pays producteurs de ces métaux et par le développement du potentiel minier sur le sol européen, mais aussi par une meilleure maîtrise du recyclage.

Au rythme actuel, les ressources connues en 2010 risquent d'être taries d'ici 15 à 30 ans. Mais il est extrêmement difficile d'estimer les ressources minérales de la croûte terrestre. La prospection minière et la modélisation des réservoirs font sans cesse varier les chiffres.

La filière de collecte, de tri et de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), opérationnelle depuis novembre 2006, peut encore être améliorée et faciliter ainsi le recyclage des matériaux rares. L'enjeu est aussi environnemental : les terres rares ne se trouvent pas pures dans les gisements mais sous forme de minerais (oxydes) qu'il faut traiter chimiquement. Or ces traitements sont réalisés directement sur site. Développer le recyclage de ces matériaux permettrait d'avoir moins recours à l'extraction elle-même et présenterait donc aussi un bénéfice environnemental.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Lepmi, BRGM
- Umicore, Malco (recyclage des non-ferreux), Valmet, Récupyl (essaimage du Lepmi), Terra Nova, Récyclum
- Federec, Fédération des Minerais, Minéraux industriels et des Métaux non Ferreux (Fedem)
- Pôles de compétitivité Team2 et Axelera

### Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : Osaka University, University of Tokyo
- Hitachi, Taivo Koko Co

## Position de la France

A l'heure actuelle, le recyclage de ces matériaux rares en France est quasi inexistant : il devient urgent de se pencher sur la question de l'exploitation des « mines urbai-



nes », comme c'est déjà le cas au Japon, qui est parvenu à un rendement de 500 g d'or par tonne de composants électroniques traités.

Des actions commencent à voir le jour. L'État a mis en place un plan d'action "métaux stratégiques", qui comporte un volet recyclage dont la première action a consisté à mener une étude sur la présence de 14 métaux dans les gisements de déchets.

Le pôle Team2 ambitionne la mise en place d'une solution opérationnelle pour la captation de l'Indium d'ici à 2012. Un autre de ses objectifs est que la région Nord-Pas de Calais devienne en 2015, la première région pour la production de métaux et terres rares de récupération.

Globalement, tous les pays sont en retard sur cette question par rapport au leader, le Japon [48].

## Analyse AFOM

### Forces

Tissu de recherche français.

### Faiblesses

La filière DEEE doit être améliorée, des incitations réglementaires pourraient être utiles.

### Opportunités

Contexte géopolitique.

### Menaces

Avance du Japon dont la R&D est très active.

## Liens avec d'autres technologies clés

31

38

### Maturité (échelle TRL)

<input checked="" type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort

## Recommandations

Accroître la veille réglementaire et économique est un des leviers pouvant faciliter la diffusion de ces technologies, afin de respecter et d'anticiper au mieux les dispositions réglementaires.



## 38. Technologies de tri automatique des déchets

### Description

Le tri est une étape intermédiaire du traitement des déchets, dont la fonction consiste à transformer un flux de déchets mélangés en plusieurs fractions de déchets, dont certaines seront ensuite valorisées ou prises en charge par d'autres filières.

Les procédés de tri automatique se basent, pour les exploiter, sur les propriétés physiques des déchets permettant de les différencier les uns des autres. Ces technologies permettent notamment un meilleur rendement et une meilleure productivité du tri. Une large variété de technologies existe :

- le tri aéroulque : trommel ou séparateur hydraulique qui se base sur les différences de densité, de forme, de portance de l'air... Cette technologie intervient en tant que préparateur de flux, facilitant la séparation des déchets ;
- le tri magnétique des métaux ferreux par extraction magnétique des non ferreux par courants de Foucault ;
- le tri électrostatique pour la séparation des métaux et des plastiques par la création d'une charge électrostatique par Corona ou triboélectricité, puis séparation par attraction-répulsion ;
- le tri mécanique par criblage (séparation en fonction de la forme, de la taille...), par séparateur balistique... ;
- le tri optique par couleur : identification de matières plastiques par la couleur. Cette technologie est souvent associée à une technologie de proche infrarouge qui permet d'atteindre un niveau de détail plus important.

Globalement, toutes les grandes familles de déchets peuvent être traitées aujourd'hui par les technologies de tri automatique.

Des progrès sont désormais à réaliser au sein des sous-familles de déchets afin de les traiter de façon plus précise. Par exemple, des efforts doivent être faits sur les technologies de tri mécano-biologique (TBM) applicables notamment au gisement des ordures ménagères résiduelles, le tri industriel de déchets d'activités en mélange (encombrants de déchèterie, déchets divers du bâtiment...), le tri des recyclables « secs », papiers et emballages de collectes sélectives. Ces dernières viendraient en appui à une éventuelle extension des consignes de tri nationales des plastiques qui nécessiterait une automatisation croissante des centres de tri existants.

### Applications

Bien que le tri soit traditionnellement effectué par des méthodes manuelles, certains éléments comme les métaux ou les emballages peuvent désormais être triés par des systèmes automatiques, permettant d'améliorer le taux de productivité de l'activité.

Le tri automatique a également permis d'étendre l'activité à la séparation de déchets qui ne pouvait être réalisé manuellement comme l'identification des plastiques par trieurs optiques.

De façon générale, les installations de tri associent le tri manuel et le tri automatique, notamment pour les déchets d'emballages. Plusieurs méthodes de tri sont ainsi successivement utilisées en fonction de la nature et des propriétés de la fraction à séparer : métaux, matières plastiques...

Le tri magnétique est une technologie bien maîtrisée et qui se retrouve dans la plupart des centres de tri.

En 2009, 3,5 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés (DMA) ont été triés avec un objectif de 3,8 millions de tonnes d'ici à 2012, et 3,3 millions de tonnes de déchets non dangereux des entreprises (DNDE) ont été triés avec un objectif de 3,9 millions de tonnes d'ici à 2012 selon les objectifs du Grenelle de l'environnement.

Parallèlement, l'activité du tri DMA a représenté 2 236 emplois en 2008 avec un objectif 2012 de 2 538 emplois, et l'activité du tri DNDE a représenté 2 241 emplois en 2008 pour un objectif de 2 605 en 2012 selon les objectifs du Grenelle de l'environnement.

Le marché de construction de centres de tri OM en 2009 représente 18 M€, en baisse par rapport à 2007 [50].

### Enjeux et impacts

Globalement, la diffusion des technologies de tri automatique reste encore faible au vu du parc actuel [3] mais leur utilisation au sein de centres de tri traitant des quantités importantes augmente de façon conséquente et la plupart des centres de tri qui se construisent aujourd'hui intègrent ce type de technologies, notamment les centres de tri haute performance [51].

Le développement de ces technologies représente un enjeu majeur vis-à-vis de la préservation des ressources en matières premières. L'efficacité du tri conditionne celle du recyclage.

En termes de réglementation, la directive-cadre européenne sur les déchets fixe des objectifs ambitieux aux États membres d'ici à 2020, notamment en termes de recyclage : 50 % des déchets ménagers et assimilés devront être recyclés ainsi que 70 % des déchets générés par les activités du BTP. Par ailleurs, une hiérarchie de la gestion

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

des déchets en cinq étapes a été établie afin d'en clarifier les applications [8].

En France, les objectifs nationaux fixés par le Grenelle de l'environnement visent à améliorer le taux de recyclage matière et organique à 35 % en 2015 et 45 % en 2020 et porter le taux de recyclage des déchets d'emballages ménagers et déchets banals des entreprises à 75 % en 2012 [49].

Le plan d'actions français 2009-2012, qui intervient dans le prolongement des travaux du Grenelle de l'environnement, s'inscrit pleinement dans les orientations de la directive européenne et doit permettre à la France d'être un des pays européens les plus avancés dans le domaine de la gestion des déchets [8].

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : BRGM
- **Industriels** : Équipements : Delta Neu, Galloo Plastics, Pellenc, Vauche... ; opérateurs de centres de tri : Coved, Onyx, Sita...
- **Pôles de compétitivité** : Team2 et Axelera

### Principaux acteurs étrangers

- Binder+CO, Bollegraaf, LLA instruments, MDE...

## Position de la France

La société PELLENC a un rayonnement international et reste en très en pointe vis-à-vis des technologies de tri et notamment la technologie de tri optique.

L'Ademe soutient l'investissement dans la recherche sur les technologies de tri ainsi que la modernisation du parc de centres de tri dans le cadre des objectifs du Grenelle. L'Ademe a ainsi lancé un appel à projet afin de développer les procédés de tri et de séparation, les systèmes de reconnaissance et d'identification et les dispositifs de séparation et d'extraction de la matière et des éléments indésirables concernant notamment le démantèlement d'équipements complexes multi-matériaux, les textiles, le mobilier hors d'usage et les métaux stratégiques.

La France est aujourd'hui en retard vis-à-vis de ses voisins allemands et anglais qui disposent de centres plus grands et plus automatisés. Cependant, la France est aujourd'hui en train de s'équiper notamment de centres de tri haute performance, qui devrait permettre la production de matières premières plus compétitives que ses voisins.

## Analyse AFOM

### Forces

Deux leaders mondiaux français de la récupération : Veolia Environnement et Suez Environnement.

### Faiblesses

Une diffusion des technologies de tri et de valorisation des déchets encore faible.

### Opportunités

Un élargissement des consignes de tri au niveau national, la raréfaction des ressources naturelles contribuant au développement des filières et plus largement un contexte réglementaire et politique favorable.

### Menaces

Une rentabilité du secteur qui reste très dépendante du cours des matières premières et de la stabilité des conditions d'approvisionnement.

## Recommandations

La réflexion sur le développement et la diffusion des technologies de tri automatique des déchets est bien sûr à mener dans une logique de filière (collecte, tri, traitement...). Développer les technologies de tri plus performantes n'a de sens que si l'ensemble de la chaîne est optimisé.

Il convient de souligner que le tri à la source des déchets, par les usagers eux-mêmes reste plus efficace, du moins si les pratiques évoluent en ce sens. Développer les actions d'information et d'éducation des usagers et des industriels sur le tri amont des déchets est donc probablement un levier intéressant. Dès lors, on peut imaginer que le tri aval soit à terme dédié au traitement de flux résiduels de déchets.

## Liens avec d'autres technologies clés

31

37

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 39. Valorisation matière des déchets organiques

### Description

On parle ici de déchets organiques au sens large, *i.e.* les boues de stations d'épuration (STEPs), les déchets d'origine marine, digestats [53] mais aussi la fraction fermentescible des déchets agricoles, ordures ménagères, bio-déchets, déchets des industries agroalimentaires, restauration, invendus des hypermarchés....

Deux types de valorisation de ces déchets sont envisageables :

- la valorisation énergétique, non appréhendée dans le cadre de cette fiche ;
- la valorisation matière : qui comprend épandage, compostage et recyclage industriel.

Les verrous concernent :

- l'amélioration de la qualité des boues de STEP : le verrou porte sur leur teneur en métaux lourds et en polluants émergents. L'action peut être conduite soit en amont des stations, soit dans les stations elles-mêmes. Le type de pollution et son degré vont déterminer les voies de traitement possible ;
- le devenir de la fraction solide du digestat : la fraction solide des méthaniseurs est soumise aujourd'hui à des normes qui empêchent sa valorisation matière ;
- le développement de la technologie TBM (tri mécano-biologique) sur le gisement des ordures ménagères résiduelles : cette technologie associe fermentation puis séparation de la fraction organique à composter des autres matières présentes.

Tout ceci ne sera pas possible sans une action préventive menée en amont, et passant notamment par :

- l'amélioration de la collecte et du tri des déchets permettant d'augmenter leur taux de valorisation : la valorisation des gisements des gros producteurs constitue un enjeu majeur pour sa valorisation ;
- une augmentation des capacités de valorisation biologique de la fraction organique des déchets ménagers et assimilés.

### Applications

L'objectif de la valorisation matière des déchets organiques est le retour au sol d'une matière organique de qualité, compatible avec les objectifs de préservation des milieux.

Épandage et incinération sont les voies de gestion des boues de STEP les plus répandues actuellement. Mais certains acteurs de l'industrie agroalimentaire (exemple : Bonduelle) refusent désormais de travailler avec des agriculteurs qui épandent ces boues sur leurs cultures en raison de la qualité des boues.

1,8 million de tonnes de compost a été produit en 2006 à partir d'un gisement estimé à 5,2 millions de tonnes



de déchets. Il comprend des déchets verts, des boues d'épuration et la fraction organique des ordures ménagères résiduelles. (Source : Itom 2006).

En 2007, en France, sur les déchets collectés par le service public, seuls 14 % faisaient l'objet d'une gestion biologique, alors que la fraction organique des ordures ménagères résiduelles s'élève à 50 %.

### Enjeux et impacts

Les objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement en matière de valorisation matière des déchets organiques imposent de doubler l'ici à 2015 les capacités de valorisation biologique de la fraction organique des déchets ménagers et assimilés.

Le plan d'actions, qui couvre la période 2009-2012 [8], fixe des objectifs quantifiés :

#### Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

#### Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation



- réduire de 7 % la production de déchets ménagers et assimilés par habitant sur les cinq premières années ;
- diminuer de 15 % les quantités partant à l'incinération ou au stockage.

Pour atteindre ces objectifs, les enjeux sont d'ordre :

- technique : production de boues plus sûres, en plus petite quantité et de meilleure qualité (boues valorisables et « sans odeur ») ;
- économique : quel modèle économique de la valorisation matière de ces déchets organiques ? Le prix de la gestion des boues se répercute sur le prix de l'eau par exemple ;
- réglementaire : la fraction solide des méthaniseurs est soumise aujourd'hui à des normes qui empêche sa valorisation matière.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Ademe, Agences de l'eau, Ifremer, Station biologique de Roscoff, Gepea, Inra (Nantes et Jouy-en-Josas), LRCCP
- Veolia Eau, Suez (Safège, Degrémont, Lyonnaise des eaux, Ondeo Industrial Solutions), Saur (Saur France, Coved, Stereau), Stereau...
- Pôles Eau, Mer Bretagne et Mer Paca, deux plateformes en Bretagne voulues par l'État, pôle Team

### Principaux acteurs étrangers

- Remondis, Interseroh, Urbaser, Shanks...

## Liens avec d'autres technologies clés

34

39

## Position de la France

Les méthodes de traitement diffèrent sensiblement entre les états membres. En 2007 selon Eurostat, l'office statistique des communautés européennes, dans l'Union européenne des vingt-sept, 42 % des déchets municipaux traités ont été mis en décharge, 20 % incinérés, 22 % recyclés et 17 % compostés.

Les plus fortes proportions de déchets municipaux compostés l'ont été en Italie, en Autriche et aux Pays-Bas.

## Analyse AFOM

### Atouts

Actions des pouvoirs publics (politique des déchets 2009-2012).

### Faiblesses

Développement insuffisant du compostage domestique, captage des gisements des gros producteurs insuffisant.

### Menaces

Contexte normatif, dimension sociale (compostage domestique).

## Recommandations

Aujourd'hui, le devenir de la fraction solide du digestat des méthaniseurs est complexe à cause des normes auxquelles elle est soumise : un travail d'influence pour modifier la norme serait bénéfique.

La collecte, le tri et la valorisation des déchets organiques sont étroitement liés à l'existence de débouchés. État, collectivités, représentants de l'agriculture et de la production alimentaire, associations environnementales et usagers ont tous un rôle à jouer pour favoriser les débouchés pour des composts de qualité.

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 40. Éco-conception

### Définitions

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale permettant de quantifier les impacts d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie (de l'extraction des matières premières le composant jusqu'à son élimination).

### Description

L'éco-conception n'est pas une technologie à proprement parler. Il s'agit plutôt d'un concept : tout produit ou service a un impact sur l'environnement, à une étape ou une autre de son cycle de vie. Ce peut être par l'intermédiaire de ses consommations énergétiques, de ses émissions ou des déchets qu'il génère.

L'éco-conception vise à réduire ces impacts, sans diminuer les qualités d'usage (durée de vie, réduction des coûts, des risques...) du produit ou du service. Elle tend même à les améliorer.

L'éco-conception concerne tous les secteurs applicatifs. Il n'y a pas une technologie proprement dite à définir. Chaque produit ou service nécessite son développement propre afin de trouver de nouveaux axes de conception améliorant les performances environnementales du produit. Les efforts de R&D à produire peuvent donc être conséquents.

Tous les types d'acteurs peuvent être concernés et proposer des produits aussi efficaces mais avec une empreinte environnementale réduite.

Dans les faits, cela se traduit par l'utilisation de matières plastiques dégradables, par un changement de réseau de distribution, une réduction des transports...

Par exemple, dans le secteur du bâtiment, la démarche consiste à réfléchir en amont à concevoir un bâtiment présentant de bonnes performances énergétiques, construit à partir de matériaux ne présentant pas d'impact néfaste sur la qualité de l'air intérieur (pas d'émission de formaldéhyde notamment), et dont la future déconstruction a été anticipée (séparation des matériaux aisée afin d'en faciliter le tri, valorisation possible sur site).

Le retour sur investissement n'est pas forcément très long pour une entreprise se lançant dans une démarche d'éco-conception. Mais le coût peut tout de même constituer un frein pour les PME-PMI.

### Enjeux et impacts

Un certain nombre de normes et de rapports techniques existent aussi bien en France qu'à l'étranger. Les normes NF 14040 et 14044 sont par exemple relatives aux analyses de cycle de vie et la norme NF P 01 010 aux déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction.

Le plan d'action de l'Union européenne [61], adopté en juillet 2008 et relatif à la consommation, la production et la politique industrielle durables, vise à s'assurer que les produits en circulation sur le marché unique soient plus respectueux de l'environnement. L'éco-conception constitue la pièce maîtresse de ce plan d'action.

La Commission européenne mène une politique active de déploiement des achats publics durables dans ses États membres. Elle a notamment conduit une étude faisant l'état des lieux dans différents pays, identifiant les pays les plus avancés. Elle a notamment mis en ligne un outil (le *toolkit*) rassemblant un ensemble de fiches fournissant les critères environnementaux à utiliser dans les marchés publics [62].

Dans le cadre du Grenelle de l'environnement, la circulaire du 3 décembre 2008 sur l'exemplarité de l'État au regard du développement durable dans le fonctionnement de ses services et de ses établissements publics, instaure l'élaboration d'un plan « administration exemplaire » basé sur vingt actions communes dont une grande partie porte sur les achats durables.

Certaines entreprises trouvent dans la démarche un avantage concurrentiel, une dimension stratégique. En effet, un sondage Ifop réalisé en février 2010 sur les critères de choix des emballages dans l'agroalimentaire en France



#### Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion
● Diffusion croissante
● Généralisation

Un des outils utilisés en éco-conception est l'analyse du cycle de vie (ou ACV). Cette méthode est normalisée. En plus d'une approche multi-étape, l'éco-conception se caractérise aussi par une approche multicritère : eau, air, sols, bruit, matières premières, énergie...

### Applications

L'éco-conception s'inscrit dans des objectifs de faisabilité technique et économique, de qualité du service rendu, de maîtrise des coûts et de satisfaction client. Elle s'applique à tous les secteurs y compris les services.

#### Degré de diffusion en France

● Faible diffusion
● Diffusion croissante
● Généralisation

plaçait la notion d'impact environnemental en troisième position, derrière le prix et le caractère pratique, mais avant les critères de poids et d'esthétique.

Une étude a été réalisée conjointement par la chambre de commerce et de l'industrie de Saint-Etienne et l'Institut de développement de produits (IDP) à Montréal, en décembre 2008. Cette étude, portant sur 30 entreprises françaises et québécoises, a montré que l'éco-conception n'avait pas entraîné de détérioration de leur rentabilité et pour une nette majorité d'entre elles, la démarche a permis une augmentation de revenus. Mais il n'y a pas d'étude plus globale et l'analyse économique est souvent réalisée au cas par cas en matière d'éco-conception [64].

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- Ademe, Cemef (Mines ParisTech) : proposition de formation continue en ACV ; Cetim, les CCI, cellule « Environmental Life cycle and Sustainable Assessment » (ELSA) : consortium entre École des mines d'Alès, Cirad, Cemagref, Agromontpellier, Inra
- **Bureaux d'étude** : 3A Consulting, A3i, Airele, ACV Conseil, Bureau Veritas, Cycleco, Enviro-Conseil, Enviro-Stratégies, Epure Éco-Innovation, Estia-Innovation, Ginkgo 21, OMEGA Incorporation, RDC Environnement, BG Ingénieurs Conseils SAS, BIO Intelligence Service...
- Association Edif (Energies Durables en Ile-de-France), Organics Cluster (Rhône-Alpes)
- Plateforme [Avnir] du CD2E, association pôle éco-conception, de nombreux pôles de compétitivité se penchent sur la question (projets, journées d'informations...) : Aerospace Valley, ASTech, Fibres, Axelera, pôle Pass, Maud, Dream Eau & Milieux (aspect technologies propres : matériaux biosourcés...) et la liste n'est pas exhaustive

### Principaux acteurs étrangers

- 2.-0 LCA consultants, 2B, Aalborg University, AQUA+TECH Specialities, BASF, Boustead Consulting, Sichuan University, University of Stuttgart

## Position de la France

La France serait en retard par rapport notamment aux pays anglo-saxons. Mais dans les faits, les entreprises françaises se lançant dans l'éco-conception adoptent souvent une démarche plus forte que les sociétés anglo-saxonnes.

A travers les filières REP (responsabilité élargie du producteur), l'Etat français a introduit dans le cahier des charges des éco-organismes, le principe d'une modulation de l'éco-contribution en fonction notamment de la recyclabilité du produit concerné (les premières applications concernent certains équipements électriques et électroniques).

## Analyse AFOM

### Atouts

R&D, programmes nationaux.

### Faiblesses

Retard par rapport à d'autres pays.

### Opportunités

Prise de conscience écologique des consommateurs, marketing vert, diminution des ressources naturelles.

### Menaces

Aucune.

## Recommandations

Les recommandations pour la diffusion de ce concept touchent à la fois :

- la formation ;
- les services à développer ;
- et la veille qu'il convient de mener pour mesurer l'opportunité de s'engager dans cette démarche.

Le développement de cette approche relève de l'influence des acteurs publics, via notamment les marchés qu'ils gèrent, mais aussi des règles du marché. Les relations de type grands donneurs d'ordre-PME peuvent être un levier de diffusion si ces grands donneurs d'ordre imposent à leur sous-traitant d'adopter ce type de démarche.

## Liens avec d'autres technologies clés

31

35

38

39

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## BIBLIOGRAPHIE

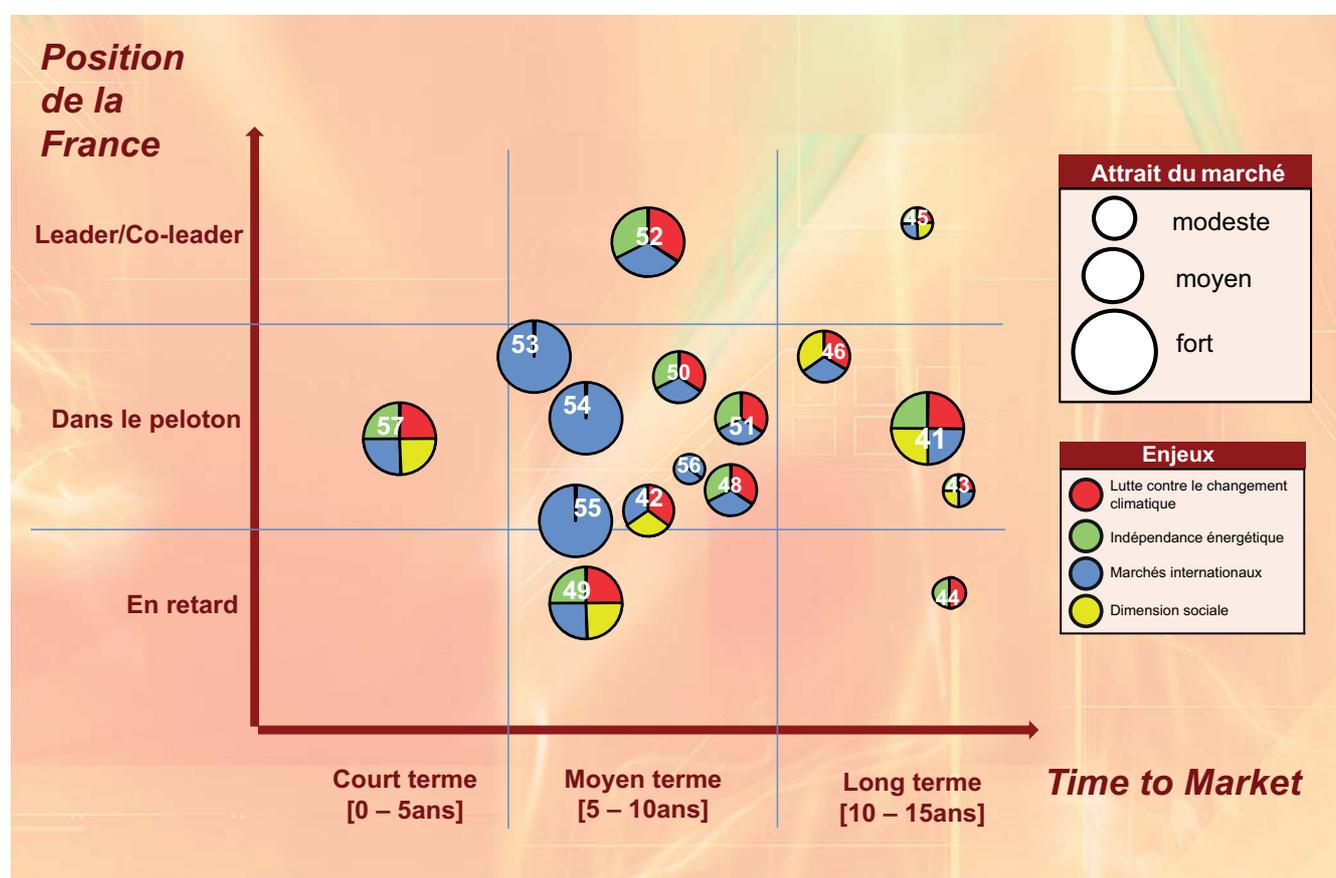
1. BCG, *Développer les éco-industries en France*, décembre 2008
2. CGDD, *L'environnement en France – Édition 2010*, 2010
3. CGDD, *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, mars 2010
4. Philippe Richert, *Qualité de l'air et changement climatique : un même défi, une même urgence*, 2007
5. Conseil d'analyse stratégique, *France 2025 : Diagnostic stratégique*, 2009
6. EPE Entreprises pour l'environnement, *L'eau à l'horizon 2025 : roadmap environnementale*, 2008
7. MEEDDM, *Stratégie nationale de développement durable 2010-2013*, 2010
8. MEEDDM, *Politique des déchets 2009-2012*, 2009
9. Olivia Montel-Dumont, *L'économie verte, Cahiers français n° 355*, mars-avril 2010
10. AAE, *Environnement en Europe, état des lieux et perspectives*, 2007
11. AAE, *Signaux de l'AAE 2009 thèmes environnementaux clés pour l'Europe*, 2009
12. AAE, *Stratégie de l'AAE 2009-2013*, 2009
13. Schneider G., *Le curage des sédiments des cours d'eau*, Le courrier de l'environnement de l'INRA
14. Levacher D., Colin D., Perroni A.C., Duan Z., Sun L., *Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers*, IX<sup>e</sup> Journées nationales génie civil-génie côtier, 12-14 septembre 2006, Brest
15. *Quand les écologistes critiquent la destruction des barrages*, <http://eau.apinc.org/spip.php?article172>
16. Semcha A., Thèse *Valorisation des sédiments de dragage : applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug*, Université de Reims Champagne-Ardenne, 11 décembre 2006
17. *Nouveau filon dans les mines : les bactéries*, Bulletin mensuel de ressources naturelles Canada (RNCAN) : éléments naturels, mai 2007 (dernière modification 26 mars 2010), n°14, <http://www.nrcan.gc.ca/com/elements/issues/14/bacter-fra.php>
18. *Worldwide exploration trends*, PDAC International Convention 2010, Metals Economics Group, 2010, [http://www.metalseconomics.com/pdf/WET%202010%20\(English\).pdf](http://www.metalseconomics.com/pdf/WET%202010%20(English).pdf)
19. Fondation de l'eau potable sûre (FEPS), *Exploitation minière et la pollution de l'eau*, <http://www.safewater.org/PDFS/resourceknowthefacts/exploitation+miniere+pollution+eau.pdf>
20. Morin D., *Les biotechnologies au service de la dépollution et de la protection de l'environnement*, Les enjeux des géosciences, novembre 2006, N°16
21. DGE, *Étude Technos clés 2010, fiche n° 11* : « Acquisition et traitement de données »
22. Pollutec Horizons : salon des solutions d'avenir au service des enjeux environnementaux et économiques, [www.pollutec.com](http://www.pollutec.com)
23. Veolia Environnement, *Le dessalement de l'eau de mer, Le magazine de la chronique scientifique*, 2005, n°4
24. Bissonnette A., *Utilisation des nanomembranes pour le dessalement de l'eau et comparaison avec l'osmose inverse et la distillation*, Mémoire en vue de l'obtention du grade de maître en environnement, Université de Sherbrooke, 2008
25. Ambassade de Chine en France / ADIT, *La Chine étudie la possibilité de dessalement des glaces de mer*, BE Chine numéro 90, daté du 22 avril 2010, <http://www.bulletins-elctroniques.com/actualites/63066.htm>
26. Corsin P., Mauguin G., *Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse : les vrais besoins en énergie*, L'eau, l'industrie, les nuisances, 2003, v. 262, pp25-29
27. Scheer S., Bas-Rabérin P., *Israël inaugure une grande usine de dessalement*, Reuters France, 16 mai 2010, <http://fr.reuters.com/article/companyNews/idFRLDE64F0ER20100516>
28. Site internet des pôles de compétitivité : Les actualités des pôles, <http://competitivite.gouv.fr/toutes-les-actualites-des-poles/actualite-du-pole-210/2010/28/dream-188/juin.html?cHash=70e5b27498e0d05713952e31afc6880e>
29. MEEDDM, *Les 12 mesures phares du PNSE2*, 12 janvier 2010 <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-12-mesures-phares-du-PNSE2.html>
30. Étude d'A. Feraudet (Sup'Biotech) sous la direction d'E. Trouvé (Véolia Eau) et D. Lando (Adebiotech), *Biotechnologies et eau : détection des polluants émergents dans l'eau – état des lieux*, Janvier 2009
31. Présentation Veolia Environnement, *Polluants émergents : solutions techniques de traitement*, 28 mars 2008
32. DGE, *Étude Technos clés 2010, Fiche n° 39* : « Mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents »
33. *De la nécessité d'accroître la connaissance sur les polluants émergents*, Article actu-environnement, 22 octobre 2009, [http://www.actu-environnement.com/ae/news/polluants-emergents\\_ineris\\_8652.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/news/polluants-emergents_ineris_8652.php4)
34. *Base de données Basol sur les sites pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif*, <http://basol.ecologie.gouv.fr/>

35. Laboudigue A., *Les technologies de dépollution : recherche, développement et méthodes d'évaluation*, Présentation au Congrès européen Eco-technologies pour le futur, Lille, 8 juin 2010
36. État de l'art réalisé par l'Adit pour le compte de l'Ademe, *Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation*, février 2006
37. Présentation de Le Gauffre P., *Projet national RERAU : Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissements urbains*, ENGEES/cemagref-ASTEE, 17 janvier 2006
38. Veolia Environnement, *La gestion de la qualité des ressources en eau*, Le magazine de la chronique scientifique, 2005, n°5
39. Eaufrance : portail d'entrée du Système d'information sur l'eau (SIE), <http://www.eaufrance.fr/index.php>
40. Site [www.waterfootprint.org](http://www.waterfootprint.org)
41. Rapport Fédération professionnelle des entreprises de l'eau (FP2E) / BIPE, *Les services collectifs d'eau et d'assainissement en France : données économiques, sociales et environnementales*, 3<sup>e</sup> édition, janvier 2008, [http://www.lyonnaise-des-eaux.fr/resources/pdf/12041894031\\_Rapport\\_BIPEFP2E\\_2008\\_BAT\\_vf.pdf](http://www.lyonnaise-des-eaux.fr/resources/pdf/12041894031_Rapport_BIPEFP2E_2008_BAT_vf.pdf)
42. Hocquard C., *Ressources minérales, nouvelles frontières*, BRGM, Ecole thématique CNRS-INSU, Nancy, 3-5 Février 2010
43. Casalegno E., *Des nanominéraux tirés des déchets, la science et les technologies russes au jour le jour*, Intelink Press (Intelligence et système de veille stratégique), 22 avril 2010, [http://www.intelink.info/actualites/sciences/1004221907\\_la\\_sciences\\_et\\_les\\_technologies\\_russes\\_au\\_jour\\_le\\_jour](http://www.intelink.info/actualites/sciences/1004221907_la_sciences_et_les_technologies_russes_au_jour_le_jour)
44. Denzler L., *Les déchets électroniques, source de matières premières*, 23<sup>e</sup> apéro scientifique de l'EMPA, Dübendorf/St-Gall/Thoune, mai 2005
45. Burns S., *Recycling of Rare Earth Metals faces challenges*, MetalMiner (Sourcing and trading intelligence for global metals markets), 16 juin 2009, <http://agmetminer.com/2009/07/16/recycling-of-rare-earth-metals-faces-challenges/>
46. Macqueron G., *Des terres rares en abondance pour les technologies vertes ?*, Futura-Sciences, 18 décembre 2009
47. Union européenne, *List of 14 critical mineral raw materials*, Memo/10/263, 17 juin 2010
48. Ambassade de France au Japon / ADIT, *Politique japonaise d'approvisionnement en métaux rares*, BE Japon numéro 538, daté du 14 mai 2010, <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/63354.htm>
49. Ademe, *Les chiffres clés des déchets*, 2009
50. Ademe, *Marchés et emplois des activités liées aux déchets en France : quel impact du Grenelle ?*, Ademe&Vous, Stratégies et études n° 25, 9 juillet 2010
51. Appel à projets Éco-industries 2010 / Axe 3 : Transformer vers des matières premières secondaires. Les priorités de l'Ademe en termes de Recherche et Développement sur les technologies de tri et recyclage.
52. Ademe, *Le marché des activités liées aux déchets*, Synthèse, Mars 2007
53. Site [http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/digestats\\_valorisation.html](http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/digestats_valorisation.html)
54. Total, *Les plastiques*, dossier « Pour comprendre les énergies » [planete-energies.com](http://www.planete-energies.com), <http://www.planete-energies.com/contenu/dossier/plastiques/recyclage.html>
55. Éco-emballages, *Le recyclage des emballages plastiques*, <http://www.ecoemballages.fr/le-tri-des-emballages/du-recyclage-au-recycle/plastique/>
56. Lagadec C., *La mise en œuvre d'une directive européenne : exemple de la directive-cadre sur l'eau dans le bassin Loire-Bretagne à travers le regard d'une association de protection de l'environnement : eau et rivières de Bretagne*, Mémoire de stage pour l'obtention du master aménagement et gestion intégrée des ressources environnementales (Agire), 2007
57. Héraud B., *Encore des obstacles pour la valorisation des algues vertes*, interview de Jean-François Sassi du Centre d'étude et de valorisation des algues (Ceva), Novethic, 01 septembre 2009
58. Boudehane K., *La Chine accroît sa capacité de recyclage du plastique*, Plastiques et Caoutchouc Magazine, 25 août 2009, <http://plastiques-caoutchoucs.com/La-Chine-accroit-sa-capacite-de-856.html>
59. Boeglin N.n Veuillet D., *Introduction à l'analyse du cycle de vie (ACV)*, Note de synthèse externe, Ademe, mai 2005
60. Agence régionale de de l'environnement de Haute-Normandie (ARHEN), *Dossier « on déballe tout sur les emballages »*, avril 2009, <http://www.arehn.asso.fr/dossiers/emballages/emballages.html>
61. Unité politique industrielle durable, Direction générale des entreprises et de l'industrie, *L'éco-conception pour un avenir durable*, magazine en ligne *Entreprises et industrie* de la Commission européenne, 19 novembre 2009, [http://ec.europa.eu/entreprise/e\\_i/news/article\\_9741\\_fr.htm](http://ec.europa.eu/entreprise/e_i/news/article_9741_fr.htm)
62. Commission européenne, *Toolkit : mallette de formation aux PME* de la Commission européenne, [http://ec.europa.eu/environment/gpp/toolkit\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/gpp/toolkit_en.htm)
63. Ademe, *Management environnemental et éco-produits*, <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=1&cid=96&m=3&catid=12913>
64. Chambre de commerce-industrie et services de Saint-Etienne/Montbrisson et Institut de développement de produits (IDP), *L'écoconception : quels retours économiques pour l'entreprise ?*, Collaboration pôle d'écoconception et management de cycle de vie Décembre 2008
65. Mutations économiques dans le domaine de la chimie, Étude Pipame, février 2010



# Énergie

- 41. Carburants de synthèse issus de la biomasse
- 42. Solaire thermodynamique
- 43. Énergies marines
- 44. Piles à combustible
- 45. Technologies de l'hydrogène
- 46. Captage, stockage et valorisation du CO<sub>2</sub>
- 47. Énergie nucléaire\*
- 48. Solaire photovoltaïque
- 49. Énergie éolienne en mer
- 50. Géothermie
- 51. Stockage stationnaire d'électricité
- 52. Réseaux électriques intelligents
- 53. Technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures
- 54. Technologies de raffinage des hydrocarbures
- 55. Technologies pour l'exploration, l'extraction et les traitements des ressources minérales
- 56. Carburants de synthèse issus de ressources fossiles
- 57. Biomasse et déchets : valorisation énergétique



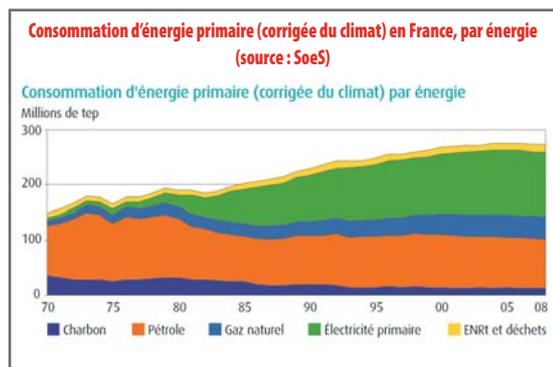
(\*) Considérant les caractéristiques en termes d'accès au marché qui peut être très court, dans le cas de la maintenance par exemple ou très long terme pour les aspects technologiques, le type de graphique ci-dessus n'est pas adapté à la représentation de la technologie clé « Énergie nucléaire ».

## Contexte et enjeux

### Le bilan énergétique national

La France était en 2007 le huitième plus grand consommateur d'énergie au monde, derrière les États-Unis (premier consommateur mondial), la Chine, la Russie, l'Inde, le Japon, l'Allemagne et le Canada. Avec 4,15 tep consommées par habitant et par an, elle se situe légèrement en dessous de la moyenne des pays de l'OCDE, soit 4,64 tep en 2007.

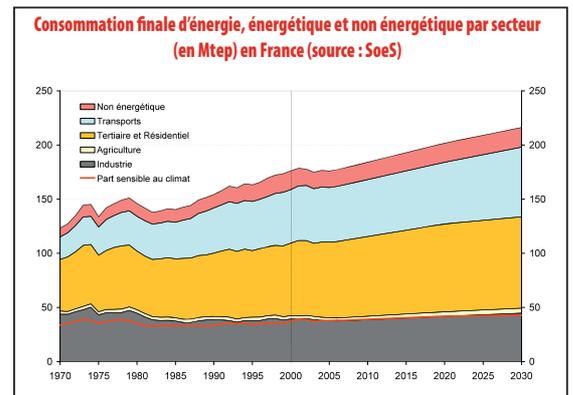
La consommation d'énergie primaire en France s'est élevée à 274 Mtep en 2008. Trois énergies dominent largement ce bilan : l'électricité (43 %), le pétrole (32 %) et le gaz naturel (15 %). Si la composition de ce « mix énergétique » a fortement évolué depuis les années soixante-dix, avec notamment la part importante prise par l'électricité d'origine nucléaire, elle a eu tendance à se stabiliser durant les années 2000. La consommation de pétrole, quant à elle, a eu tendance à se concentrer dans le secteur des transports.



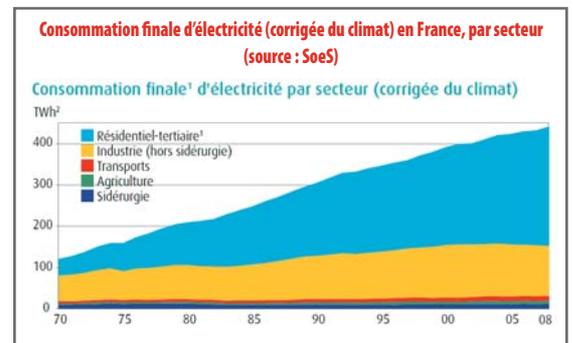
Selon les projections établies par la DGEC dans le scénario énergétique de référence publié en 2008, la croissance de la consommation d'énergie primaire serait de + 0,7 % par an d'ici à 2030, avec un léger ralentissement sur la dernière décennie (+ 0,6 % en moyenne). On note en particulier une forte croissance des énergies renouvelables, à la fois sous forme d'électricité (+ 2,5 % par an en moyenne) et de chaleur (+ 1,9 % par an), celles-ci ne représentant toutefois qu'une part mineure par rapport à l'électricité d'origine nucléaire, au pétrole et au gaz naturel ; l'évolution la plus notable concernerait le gaz naturel, dont la consommation, tirée par la production d'électricité, augmenterait au rythme de + 2,3 % par an.

### Les évolutions sectorielles

Depuis 1973, la part relative de l'industrie dans la consommation d'énergie au niveau national a fortement diminué (de 36 % à 23 %, hors branche énergie), alors que celle du secteur résidentiel-tertiaire s'est stabilisée et que celle des transports a connu une croissance significative (de 19 % à 31 %). À l'horizon 2030, la consommation d'énergie dans l'industrie devrait peu évoluer, sa part relative continuant donc à baisser.



Cette période a par ailleurs été marquée par une forte progression de la consommation d'électricité, qui a crû deux fois plus vite que la consommation globale d'énergie, résultat, pour l'essentiel, de la substitution massive du fioul par l'énergie nucléaire pour la production d'électricité. Le secteur résidentiel-tertiaire représente désormais à lui seul les deux tiers de la consommation finale d'électricité, contre 30 % pour l'industrie (y compris la sidérurgie), une part relative qui tend par ailleurs à décroître.



### Les tendances au niveau mondial

Selon le scénario tendanciel de l'AIE, les besoins en énergie au niveau mondial pourraient croître de 84 % entre 2007 et 2050. En Chine, la consommation d'énergie pourrait doubler d'ici à 2030 ; toutes les sources d'énergie seraient concernées, le charbon restant toutefois dominant, avec comme conséquence un doublement des émissions de CO<sub>2</sub> (pour lesquelles la Chine occupait déjà en 2007 la première place, devant les États-Unis). Toujours selon ce scénario, les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) représenteraient encore plus de 85 % de la fourniture d'énergie primaire au niveau mondial. De fait, si une stabilisation, voire une diminution des besoins en hydrocarbures des pays de l'OCDE est envisageable à court terme, ce ne saurait être le cas des pays en voie de développement.

Une des conséquences est que les préoccupations géopolitiques relatives aux marchés du pétrole et du gaz naturel sont appelées à jouer durablement un rôle clé en matière d'énergie. En effet, plus des deux tiers des réserves mondiales de pétrole conventionnel sont concentrés au Moyen-Orient, dont un quart en Arabie Saoudite. Les réserves de gaz naturel sont

elles-mêmes relativement concentrées : ainsi, la Communauté des États indépendants en détient environ un tiers. Au total, l'Opep et la Russie détiennent les trois quarts des réserves de pétrole, et trois quarts des réserves de gaz. La conséquence est qu'à long terme, l'économie mondiale est appelée à dépendre d'un nombre restreint de pays producteurs d'hydrocarbures, dans un contexte où la marge de manoeuvre des pays de l'Opep au niveau des moyens de production est limitée et où les capacités de raffinage sont sous tension. Dans cette situation tendue, tout aléa climatique ou géopolitique se traduit immédiatement par une flambée des prix.

## Les ressources en hydrocarbures

La question du « pic pétrolier mondial » (« peak oil »), qui fait référence à la date à laquelle la production mondiale de pétrole atteindra son maximum puis commencera à décliner du fait de l'épuisement des réserves, fait l'objet de débats réguliers, les avis divergeant fortement à ce sujet.

Ce pic dépendra à la fois de l'évolution de la production et de la consommation (on introduit ainsi également la notion de « pic de la demande »). Le bilan des réserves prouvées pour les principales sources d'énergie, qui équivalent à 40 années de production pour le pétrole conventionnel, 70 années par le gaz naturel et l'uranium (utilisé selon les méthodes actuelles, hors réacteurs de quatrième génération qui multiplieront cette ressource de deux ordres de grandeur) et 170 années pour le charbon, montre qu'il n'y a pas de risque de pénurie à court terme, même pour les hydrocarbures. Des investissements massifs restent toutefois nécessaires : ainsi, selon l'AIE, près de la moitié de la capacité de production mondiale de gaz naturel devra être remplacée d'ici à 2030 en raison de l'épuisement des gisements. Il s'agit toutefois de perspectives à moyen-long terme ; dans l'immédiat, la récession économique qui a débuté en 2008 devrait avoir comme conséquence une diminution de la consommation énergétique en 2009, avec comme corollaire un tassement conjoncturel du cours des hydrocarbures.

Dans le cas du pétrole, trois leviers principaux devraient permettre de maintenir dans les prochaines années la production à un niveau suffisant :

- tout d'abord, le maintien des investissements dans l'amont pétrolier ; il faut toutefois noter que le rythme de découverte de nouveaux gisements s'est ralenti et que leur taille moyenne a diminué, ce qui implique que les investissements en exploration et pour la mise en production sont plus longs à amortir ;
- ensuite, une exploitation plus efficace des gisements existants : en moyenne, seulement un tiers du pétrole d'un gisement est récupéré ; l'amélioration de ce taux de récupération, par exemple grâce à la mise en oeuvre nouveaux procédés, permettra de repousser l'échéance d'épuisement de ces gisements ;
- enfin, l'exploitation de ressources non conventionnelles ; un des exemples les plus connus est celui des sables bitumineux de la province d'Alberta, au Canada ; le coût environnemental de cette exploitation est toutefois élevé et devra être incorporé dans la chaîne de valeur : déforestation, consommation de gran-

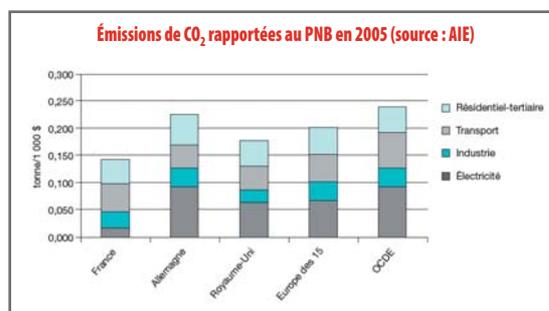
des quantités d'eau, rejets liquides (eaux usées) et gazeux (composés soufrés, en particulier)...

Par ailleurs, il faut souligner que les ressources pétrolières hors Opep sont en voie d'épuisement, ce qui implique une dépendance de plus en plus marquée vis-à-vis des pays de l'Opep, alors que certains de ceux-ci peuvent éprouver des difficultés (voire des réticences) à augmenter leurs capacités de production. Pour l'ensemble de ces raisons, les prix vont très probablement rester structurellement orientés à la hausse.

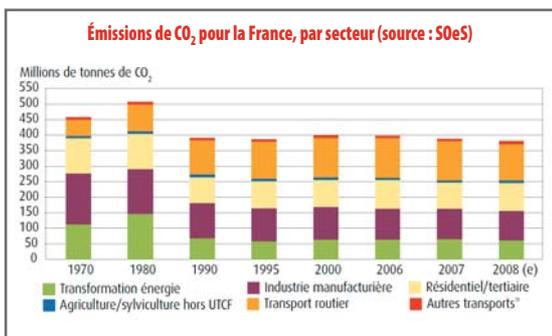
## Le changement climatique

En matière de scénarios sur le changement climatique, il est devenu usuel d'utiliser l'échéance de 2050 comme point de repère. Deux scénarios, en particulier, encadrent les « avenir possibles » : le premier caractérisé par un objectif « raisonnable », revenir en 2050 au niveau d'émission actuel ; le second, caractérisé par un objectif ambitieux, diviser par deux les émissions mondiales par rapport au niveau actuel (voir à ce sujet le rapport de la commission énergie du Centre d'analyse stratégique, ainsi que le scénario « Blue Map » de l'AIE, évoqué ci-après). Ce dernier objectif est à différencier selon le stade de développement du pays considéré : pour les pays les plus industrialisés, il s'agit de diviser par quatre les émissions de GES d'ici à 2050. C'est cet objectif qui est rappelé à l'article 2 de la loi de programme de 2005 fixant les orientations de la politique énergétique.

À ce stade, il est utile de rappeler que les émissions de CO<sub>2</sub> de la France, rapportées aux différents secteurs émetteurs, possèdent une structure relativement atypique. Cela résulte principalement du fait que la production d'électricité repose pour l'essentiel sur des énergies très faiblement émettrices : nucléaire et, dans une moindre mesure, hydraulique. En revanche, on constate que les niveaux d'émission des autres secteurs (résidentiel-tertiaire, transport et industrie) sont, toutes proportions gardées, comparables à ceux des autres pays développés.



Dans le détail, on constate que ce sont les émissions issues du secteur des transports qui ont connu la plus forte progression en l'espace de quelques décennies – devenant ainsi le premier secteur émetteur – alors que celles issues du secteur résidentiel-tertiaire progressent à un rythme nettement plus lent depuis les années 1990, et que celles issues de l'industrie sont en décroissance régulière.



Au niveau international, les questions relatives au changement climatique et aux émissions de GES font l'objet d'un traité international connu sous le nom de protocole de Kyoto. Négocié à partir de 1997, celui-ci arrive à échéance en 2012, et la préparation de « l'après-Kyoto » a déjà démarré. Les négociations s'avèrent toutefois délicates : ainsi, la 15<sup>e</sup> Conférence des parties (COP) qui s'est tenue à Copenhague fin 2009 n'a pas permis d'aboutir à un consensus sur des objectifs chiffrés de réduction des émissions de GES. Les parties prenantes se sont engagées à contenir le réchauffement climatique sous la barre des 2°C ; chaque pays développé doit durant l'année 2010 fixer ses propres objectifs de réduction des émissions ; de son côté, la Chine a pour la première fois pris des engagements en termes de réduction de l'intensité énergétique. On peut toutefois noter que le texte signé n'est pas juridiquement contraignant, ce qui limite sa portée. La conférence de Cancun fin 2010 a préparé la conférence de Johannesburg pour l'après Kyoto et donné quelques avancées : l'accord de Copenhague est intégré à la Convention sur le climat, un fonds vert pour le climat est créé ainsi qu'un centre de technologie pour le climat. Le mécanisme de lutte contre la déforestation est lancé. Au-delà des incertitudes scientifiques qui peuvent subsister quant aux causes et conséquences du réchauffement climatique et de la nécessaire prise en compte de la situation économique propre à chaque pays (faut-il fixer des objectifs chiffrés contraignants aux pays les moins développés ?), le manque de solutions technologiques simples et à un coût abordable constitue un frein majeur à l'établissement d'un large consensus.

### Les contraintes temporelles

Lorsqu'on analyse de façon rétrospective les évolutions qu'a pu connaître le secteur de l'énergie, un constat s'impose : les évolutions sont lentes, « les transitions d'un système technologique à un autre s'opèrent sur des dizaines d'année ». De fait, toute réflexion prospective en matière d'énergie doit prendre en compte la relative lenteur de réaction face aux enjeux auxquels ce secteur est confronté : en particulier, les horizons temporels considérés sont en moyenne sensiblement plus éloignés que dans la plupart des secteurs.

### Les débats autour de l'acceptabilité

Historiquement, la question de l'acceptabilité a avant tout été



associée à la filière nucléaire, les débats portant en particulier sur la gestion des déchets qui en sont issus. Mais plusieurs exemples récents, comme les polémiques autour des biocarburants et de leur impact négatif sur les usages alimentaires des ressources agricoles, ou bien les réactions de rejet que peuvent susciter les projets d'implantation d'éoliennes, montrent que cette dimension doit désormais faire l'objet d'une analyse dans le cas de toute filière émergente.

De plus, cette analyse doit tenir compte des contextes locaux : le choix des sites d'implantation, que ce soit pour des opérations de démonstration ou pour des projets industriels, n'est pas neutre. Au-delà des questions particulières soulevées dans le cas de telle ou telle technologie, l'expérience montre que les débats portent de façon récurrente sur les aspects suivants :

- les questions relatives à la sécurité et aux impacts colatéraux, qu'elles soient liées à des risques industriels plus ou moins bien identifiés (fiabilité des éoliennes terrestres, par exemple) ou qu'elles relèvent d'une application éventuelle du principe de précaution (impacts potentiels de l'éolien offshore sur les écosystèmes marins, par exemple) ; dans le premier cas, la réponse est à chercher du côté de la réglementation, des normes, de la certification... ; dans le second cas, des travaux scientifiques à caractère plus fondamental peuvent s'avérer nécessaires ;
- l'impact sur le cadre de vie et les risques de dévalorisation du patrimoine, qui peuvent se traduire par un préjudice économique, éventuellement quantifiable ;
- la nécessaire évolution des modes de vie, résultat, en particulier, de nouvelles incitations et contraintes au niveau des usages finaux de l'énergie (bâtiment, transports...).

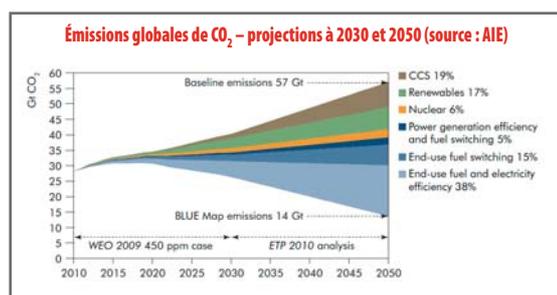
Dans tous les cas, il s'avère nécessaire d'associer les citoyens en amont des réflexions – on peut rappeler à ce sujet que le principe de participation fait partie des principes fondamentaux du droit de l'environnement. La tenue de débats publics précédant un projet sur un site donné peut se révéler insuffisante : les choix effectués doivent être suffisamment expliqués, un des enjeux étant de démontrer que ceux-ci relèvent d'une vision à long terme et non d'un quelconque effet d'aubaine (exemple des débats autour de la multiplication des projets dans le domaine de l'éolien ou du photovoltaïque).

## Les grandes tendances d'évolution du secteur

### La réponse au changement climatique

Les voies possibles pour lutter contre le changement climatique se répartissent schématiquement en deux catégories : produire de l'énergie en ayant recours à des technologies plus « propres » ; utiliser l'énergie de façon plus rationnelle.

Les scénarios établis dans le cadre de l'AIE permettent d'avoir une vision plus précise des contributions potentielles de chacune des grandes familles technologiques.



Le scénario « Blue Map » est le scénario optimiste, dans lequel les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie sont réduites de moitié d'ici à 2050, par rapport à leur niveau de 2005. Selon ces projections, et en comparaison avec les évolutions tendancielles, plus de la moitié (53 %) de la différence observée provient de l'efficacité énergétique (au niveau des usages finaux) ainsi que des changements de combustible. Les deux autres principales contributions proviennent ensuite du captage et du stockage du CO<sub>2</sub> et des énergies renouvelables.

La réduction des émissions résultant de la production d'énergie concerne au premier chef la production d'électricité. En effet, celle-ci représente à elle seule 32 % de la consommation mondiale de combustibles fossiles, et 41 % des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur de l'énergie. Depuis 1990, la part du charbon dans la production d'électricité est passée de 37 % à 42 % en 2007 pour le

charbon, et de 15 % à 21 % pour le gaz naturel. Selon l'AIE, sur la base des évolutions tendancielles, ces parts pourraient passer respectivement à 44 % et 23 % en 2050.

La maîtrise des émissions de GES impliquera une évolution profonde de la structure du « mix énergétique » de chaque pays, l'objectif étant de tendre vers un mix autant que possible « décarboné ».

Au niveau de la production d'énergie, plusieurs options sont envisageables :

- développer la part des énergies renouvelables. Dans le contexte européen, le cadre en est principalement défini par la directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, dont la dernière version a été publiée en 2009 (directive 2009/28/CE). L'objectif fixé pour la France est que cette part représente 23 % de la consommation d'énergie finale d'ici à 2020 (contre 10 % en 2005, principalement sous forme d'électricité hydraulique et de bois-énergie) ;
- augmenter les capacités de stockage d'électricité et de chaleur. En effet, le caractère fluctuant et intermittent des énergies renouvelables, ainsi que le coût de modulation des centrales nucléaires, imposent de renforcer la maîtrise des flux énergétiques entre l'offre et la demande d'électricité. La mise en oeuvre d'installations de stockage flexibles et performantes apparaît comme un élément de réponse essentiel à cette problématique ;
- conforter la place du nucléaire. S'agissant de la production d'électricité en base, le nucléaire, le gaz naturel et le charbon sont en concurrence, ce dernier étant dominant au niveau mondial. En l'absence de captage et de stockage du CO<sub>2</sub> à un coût acceptable, la production d'électricité à partir de charbon et, dans une moindre mesure, de gaz naturel, restera handicapée par son impact du point de vue des émissions de GES, alors que la production d'origine nucléaire peut dès à présent contribuer significativement à la réduction de ces émissions. Par ailleurs, cette filière présente comme avantage de produire un kWh avec un prix relativement stable, du fait que la part du coût du combustible dans le coût de production est très faible : même une forte augmentation du prix de l'uranium n'aurait qu'un impact très limité ;

• réduire les émissions de CO<sub>2</sub> issus de la combustion d'énergies fossiles, en particulier pour la production d'électricité. Si le charbon est devenu marginal dans le mix énergétique français, ce n'est pas vrai au niveau mondial : 37 % de la production d'électricité repose sur le charbon, contre environ 4 % en France. Les réserves de charbon étant abondantes et relativement bien réparties au niveau mondial, celui-ci continuera à jouer un rôle de premier plan jusqu'en 2050 et au-delà.

Il faut néanmoins rappeler que, comme l'a rappelé la directive européenne de 2009, un levier essentiel, à court terme, pour réduire les émissions de GES, est l'amélioration de l'efficacité énergétique au niveau de l'utilisation finale dans les différents secteurs concernés : bâtiment, transports et industrie. À ce sujet, le renforcement des réglementations et l'augmentation du prix de l'énergie ont encouragé la mise au point de technologies permettant de maîtriser la consommation énergétique : on peut citer les réglementations thermiques

successives, qui ont permis de diminuer progressivement les besoins en chauffage des bâtiments neufs, ou la diminution régulière de la consommation moyenne des véhicules particuliers. Mais l'amélioration de ces performances a été au moins en partie contrebalancée par des dépenses énergétiques supplémentaires (effet rebond) : augmentation de la taille moyenne des logements, généralisation de l'équipement en électroménager et multiplication des produits « bruns », développement de la climatisation, augmentation du taux d'équipement en voiture des ménages et des distances parcourues...

## La transformation des marchés de l'électricité

Le modèle du réseau électrique national, également dénommé « réseau d'alimentation générale », reposait pour l'essentiel sur des centrales de grande taille assurant la production en « base », complétée par des moyens de production en « pointe », avec un opérateur unique pour le transport et la distribution. Dans ce modèle, la production d'électricité dite « décentralisée » n'occupait qu'une place modeste. Ce modèle est appelé à évoluer, en raison de plusieurs facteurs : tout d'abord, l'ouverture des marchés de l'électricité a permis l'apparition de quelques nouveaux acteurs au niveau national, l'objectif ultime restant toutefois la constitution d'un marché électrique européen réellement ouvert, ce qui suppose une fluidité des échanges entre pays ; par ailleurs, la production issue de sources renouvelables monte en puissance, leur caractère intermittent les différencie notablement des moyens de production conventionnels, ce qui implique une évolution du cadre réglementaire et des investissements éventuels dans certaines technologies, notamment le stockage.

## Les activités de service

Les activités de service liées aux différentes filières énergétiques sont multiples : bureaux d'étude et d'ingénierie, montage de projet, financement, négoce, exploitation et maintenance, diagnostic et expertise, conseils juridiques... Il s'agit d'un secteur hétérogène, dans lequel coexistent grands acteurs plus ou moins intégrés, PME, artisans et indépendants...

Pour l'essentiel, ce sont des activités qui se sont développées de longue date. Elles jouent un rôle essentiel dans le secteur de l'énergie, au même titre que la fabrication d'équipements ou la fourniture d'énergie proprement dite : cette dernière, qu'elle soit sous forme de combustible, de chaleur ou d'électricité, est fondamentalement perçue comme une « commodité », le client final ayant avant tout besoin qu'on lui fournisse un service énergétique plutôt que des kWh.

Les évolutions actuelles ne devraient toutefois pas se traduire par des ruptures du point de vue des métiers. La tendance est plutôt à l'intégration de nouvelles compétences dans le cadre des métiers « traditionnels » : par exemple, l'exploitation d'une chaufferie au bois demande des compétences spécifiques, en comparaison avec les chaufferies conventionnelles alimentées au gaz ou au fioul.

Dans ce contexte, de nouveaux métiers peuvent apparaître (exemple de l'activité d'« agrégateur » en réponse aux besoins d'équilibrage du réseau et de maîtrise de la pointe électrique), mais il s'agit là d'une tendance mineure. Globalement, deux grandes tendances marquent les évolutions des services énergétique :

- la professionnalisation et les besoins de formation en vue de l'acquisition de compétences nouvelles ;
- la généralisation des approches orientées « demande » (exemple des contrats de performance énergétique), centrées sur les besoins du client final.

## Les tendances technologiques et les technologies clés

Dans le domaine de l'énergie, à court-moyen terme, les tendances technologiques sont marquées par une « succession de progrès évolutifs offerts par un bouquet technologique très diversifié » plutôt que des ruptures (source : Centre d'analyse stratégique).

Il est vrai qu'en matière d'énergie, les véritables ruptures technologiques, au sens de l'apparition d'innovations technologiques se développant rapidement et modifiant en profondeur le secteur, sont rares. Ces trente dernières années ont toutefois été marquées par plusieurs innovations « majeures », telles que l'introduction des turbines à gaz, en particulier en cycle combiné, ce moyen de production s'étant peu à peu imposé comme la référence en matière de production d'électricité, ou bien la généralisation de technologies telles que la sismique 3D ou le forage dirigé, qui ont marqué l'exploration-production d'hydrocarbures.

Les principales tendances technologiques sont présentées ci-après par grandes filières.

## Les énergies renouvelables : hydraulique, énergies marines, biomasse, énergie du vent, énergie solaire

La directive européenne relative à la production d'énergie à partir de sources renouvelables joue un rôle moteur dans le développement des filières basées sur des énergies renouvelables ; cela recouvre toutefois des réalités et des potentialités très diverses :

- le potentiel hydroélectrique des pays développés est d'ores et déjà largement exploité, et la marge de manoeuvre est limitée ; inversement, le potentiel énergétique des mers est significatif, notamment en France, mais il est dispersé et aucune technologie ne permet encore à ce jour de l'exploiter de façon fiable, efficace et rentable bien que plusieurs voies soient explorées. La filière des hydroliennes pourrait atteindre une maturité



suffisante à court-moyen terme et porte sur des puissances faibles ; en revanche, les technologies de conversion de l'énergie thermique des mers ou de l'énergie de la houle, intensives en capital, s'inscrivent dans une perspective à moyen-long terme ;

- la biomasse occupe une place significative dans le bilan énergétique français actuel, principalement en combustion pour la production de chaleur. D'autres modes de valorisation pourraient permettre de mieux exploiter le potentiel français, tels que la méthanisation pour la production de biogaz ; quant aux biocarburants, si la première génération (production à partir de plantes sucrières, de céréales ou d'oléagineux) atteint ses limites (concurrence avec les usages alimentaires, en particulier), la deuxième génération, produite à partir de ressources lignocellulosiques (donc à vocation non alimentaire), pourrait prendre le relais, une fois que les procédés de conversion seront suffisamment maîtrisés. À plus long terme, une troisième génération pourrait voir le jour, qui reposerait sur l'exploitation de la biomasse marine (microalgues, en particulier) ; de nombreux verrous restent toutefois à lever : procédés de culture et de récolte, extraction à coût réduit... ;

- l'éolien terrestre a aujourd'hui atteint une certaine maturité, même si le caractère intermittent de la production rend délicate son intégration dans les réseaux électriques ; de fait, les améliorations techniques sont essentiellement incrémentales. En revanche, l'éolien offshore n'a fait son apparition que récemment (premier champ de 500 MW en 2003 au Danemark), et les obstacles techniques sont multiples : tenue des équipements en environnement sévère (milieu salin, intempéries) et raccordement au réseau électrique en particulier ;

- dans le domaine du solaire, deux technologies ont atteint un certain degré de maturité : les capteurs thermiques pour la production d'eau chaude, et les panneaux photovoltaïques à base

de silicium pour la production d'électricité ; en France, ces produits se sont principalement diffusés dans l'habitat. Les nouvelles générations de cellules photovoltaïques sont basées sur l'utilisation de matériaux inorganiques semi-conducteurs en couches minces ; des cellules basées sur des matériaux organiques pourraient aussi voir le jour.

## Les énergies fossiles

Dans le cas du pétrole, deux enjeux constituent les principaux moteurs des évolutions technologiques :

- le renouvellement des ressources, destiné à repousser la date du « pic de production » : c'est ce qui motive, par exemple, l'amélioration du taux de récupération dans les gisements déjà exploités, la production en offshore très profond, l'exploitation des réserves d'huiles extra-lourdes, ou bien encore de ressources non conventionnelles telles que les schistes bitumeux ;
- la maîtrise de la qualité des produits pétroliers, en réponse au renforcement des normes environnementales, en particulier dans le secteur des transports : il s'agit à la fois de valoriser de façon optimale (sous forme de carburants ou de bases pétrochimiques) chaque baril, tout en faisant face au recours croissant à des ressources non conventionnelles, qui nécessitent des technologies de conversion spécifiques ;
- la question de l'exploitation de ressources non conventionnelles se pose aussi dans le cas du gaz naturel : un exemple est celui du gaz issu de roches indurées, des gisements caractérisés par une faible perméabilité de la roche, ce qui freine la circulation du gaz et nécessite donc une fracturation intense pour permettre la production, et dont l'exploitation se développe en particulier aux États-Unis.

En aval, une partie des efforts se concentrent sur les technologies qui permettent de capter les émissions de CO<sub>2</sub> issues de la combustion de combustibles fossiles, en particulier du charbon. Certaines d'entre elles seront susceptibles d'équiper des centrales existantes ; d'autres, comme l'oxy-combustion, correspondent à des conceptions nouvelles. On peut par ailleurs noter que le captage du CO<sub>2</sub> sera probablement maîtrisé dans un horizon relativement proche, la question des coûts restant ouverte.

## L'énergie nucléaire

Les prochaines années seront marquées par la mise en service de centrales de nouvelle génération, dite génération III. Parmi ces réacteurs, on peut citer l'EPR (« European Pressurized Reactor »), en cours de construction sur deux sites en Europe (France et Finlande et un en Chine), opérations les plus avancées. L'Atméa-1 est un autre exemple de réacteur en cours de développement par Areva, de plus faible puissance que l'EPR. Les réacteurs de troisième génération présentent des évolutions importantes en termes de sûreté, intégrant l'historique des risques potentiels et les techniques les plus récentes. La quatrième génération constitue quant à elle une rupture technologique avec un horizon à long terme (2040). Les réacteurs de génération IV sont des réacteurs à neutrons rapides qui peuvent ainsi tirer un potentiel énergétique de la totalité de l'uranium combustible, contre moins de 1% pour les réacteurs à neutrons lents de deuxième et troisième génération.

Cette génération future fait l'objet d'une concertation au niveau international dans le cadre du programme « Generation IV International Forum ». Les partenaires impliqués ont présélectionné six filières qui apparaissent à ce jour comme les plus prometteuses ; elles se distinguent notamment par le fluide caloporteur utilisé : sodium, hélium, plomb, eau supercritique ou sels fondus. La France a choisi de se positionner sur les réacteurs à caloporteur sodium liquide (du même type que les réacteurs Phénix et Superphénix, on les désigne sous le sigle SFR – *sodium-cooled fast reactor*) ou hélium. Les systèmes de quatrième génération seront en mesure, non seulement de recycler le plutonium mais également de consommer complètement l'uranium 238.

Les RNR (Réacteurs à neutrons rapides), qui valorisent énergétiquement à la fois l'uranium naturel, recyclable ou appauvri, et tous les isotopes du plutonium, apparaissent comme une solution pour la gestion du plutonium, via son multirecyclage. Ils permettent une bien meilleure utilisation de la ressource en uranium naturel, en multipliant par un facteur d'environ 100 la quantité d'énergie produite par la même quantité d'uranium naturel. La technologie des RNR permet de rendre l'énergie nucléaire techniquement durable sur plusieurs millénaires. Ces réacteurs ont également un potentiel de gestion alternative des déchets, grâce en particulier à leur capacité potentielle de transmutation des actinides mineurs.

Les enjeux technologiques relatifs à ces réacteurs de nouvelle génération sont multiples :



- s'agissant des réacteurs de type SFR, les principales difficultés sont liées à l'utilisation d'une boucle de sodium liquide, pour laquelle il est nécessaire de limiter au maximum les risques d'interaction avec l'eau ou l'air (risques de réactions chimiques violentes) ;
- deux types de réacteurs refroidis à l'hélium sont envisageables : réacteur à neutrons rapides (GFR – *Gas-cooled Fast Reactor*) ou réacteur très haute température à neutrons thermiques (VHTR – *Very High Temperature Reactor*). À ce jour, on ne dispose pas de retour d'expérience sur les réacteurs de type GFR ; les priorités à court terme sont l'analyse de la sûreté du réacteur et la conception de l'assemblage combustible, qui doit résister aux hautes températures (environ 850°C). Les réacteurs de type VHTR, quant à eux, nécessiteront le développement de matériaux de structure résistants à de très hautes températures et de composants, tels que les échangeurs, fabriqués à partir de ces matériaux, l'objectif étant d'atteindre une température de fonctionnement de 950-1 000°C. Un des intérêts d'un tel niveau de température est la possibilité d'utiliser cette source de chaleur pour produire massivement de l'hydrogène par décomposition thermochimique de l'eau ou par électrolyse à haute température ;
- enfin, le programme ITER peut offrir des solutions à très long terme mais n'a pas été intégré dans les technologies clés eu égard à un horizon de temps excédant cet exercice.

## L'hydrogène en tant que vecteur énergétique

Peu présent en tant que tel dans la nature, ce qui implique de le synthétiser, l'hydrogène possède plusieurs attraits en tant que vecteur énergétique : énergétique (35 kWh/kg contre 15 kWh/kg pour l'essence), sa combustion, qui ne produit que de l'eau, peut être considérée comme « propre ».

Recourir à l'hydrogène à grande échelle suppose de disposer de technologies matures sur chacun des maillons de la chaîne : production en grandes quantités, transport et distribution, stockage, utilisation et, de façon transversale, sûreté. Les défis technologiques sont donc multiples :

- l'hydrogène est déjà produit de façon industrielle par « reformage » du gaz naturel, procédé mature mais qui présente comme inconvénient d'être émetteur de CO<sub>2</sub> ; l'alternative envisagée consiste à décomposer chimiquement l'eau, par électrolyse (un procédé qui reste onéreux) ou par voie thermochimique à haute température, ce qui suppose de disposer de sources de chaleur adéquates (voir les possibilités envisagées avec les réacteurs nucléaires de quatrième génération évoquées plus haut) ;
- au niveau des utilisations, l'hydrogène peut être soit directement utilisé en combustion (moteurs, turbines), soit utilisé pour alimenter une pile à combustible, laquelle produit chaleur et électricité ;
- le stockage et la distribution d'hydrogène posent par ailleurs des problèmes spécifiques, dans la mesure où ce gaz est peu dense et diffuse facilement à travers de nombreux matériaux et assemblages. De ce point de vue, les réservoirs à hydrogène sont des composants clés : s'agissant de ceux destinés à être embarqués sur des véhicules, ils doivent résister à des pressions de stockage très élevées (plusieurs centaines de bars).

## Les infrastructures électriques

Les modalités de gestion des réseaux électriques sont appelées à évoluer, sous l'effet de la transformation des marchés de l'électricité et de l'augmentation de productions à caractère intermittent issues de sources renouvelables (solaire et éolien). Les opérateurs doivent assurer l'équilibrage des réseaux dans un contexte de croissance continue de la consommation d'électricité, tout en contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique d'ensemble.

Les évolutions technologiques concernent principalement :

- les équipements qui permettent de gérer efficacement et en temps réel le transit de l'énergie sur le réseau, ainsi que les outils de pilotage et de supervision associés (logiciels et transmission de données) ;
- les moyens de stockage de l'électricité, qui permettent de faire face aux fluctuations de la production et de la consommation ;
- les moyens permettant d'optimiser le profil de consommation au niveau du client final, tels que les compteurs de nouvelle génération, rendant par ailleurs possible le développement de nouvelles offres de service.

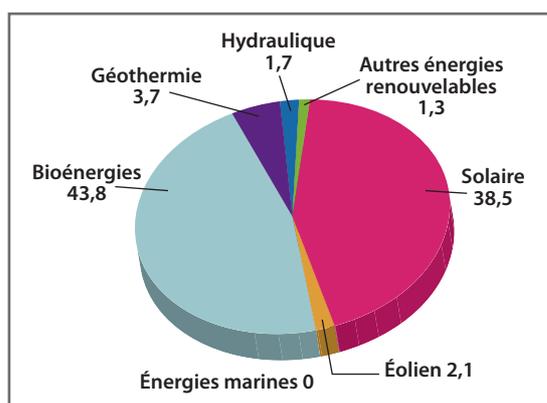
## Analyse de la position de la France

La France possédant des ressources en énergies fossiles très limitées, ses efforts en matière de développements technologiques se sont majoritairement orientés, depuis les deux chocs pétroliers, vers des filières lui permettant de rendre son mix énergétique moins dépendant de celles-ci.

C'est ainsi, en particulier, que la France a pu acquérir une position de premier plan dans le domaine du nucléaire. Des budgets significatifs ont par ailleurs été consacrés à d'autres filières, en particulier dans le domaine des énergies renouvelables : géothermie, solaire... Ces derniers ont toutefois été fortement réduits entre 1986 et 2000, une période de faible prix des hydrocarbures ayant débuté par un contre-choc pétrolier ; de plus, les tarifs d'achat de l'électricité produite par ces énergies émergentes n'étaient pas très incitatifs. Une des conséquences a été que les filières industrielles correspondantes sont restées embryonnaires, avec par exemple un seul fabricant de cellules photovoltaïques, un seul fabricant d'éoliennes... De ce point de vue, des pays tels que le Danemark, l'Allemagne ou le Japon ont pu développer un tissu industriel significatif.

La répartition actuelle des budgets de R&D publics français donne des indications sur la façon dont certains enjeux, tels que la lutte contre le changement climatique, ont pu remettre sur le devant de la scène certaines filières.

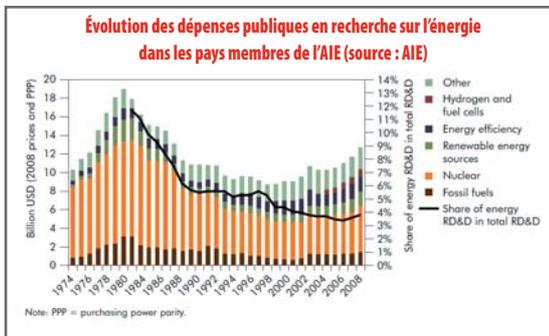
Répartition de la dépense publique en recherche sur l'énergie en 2008, en France (source : DGECC/CGDD)



La filière nucléaire (fission, fusion et gestion des déchets) bénéficiait en 2008 d'environ la moitié des financements. Suivaient ensuite les énergies fossiles (15 %), l'efficacité énergétique (14 %) et les énergies renouvelables (10 %) ; pour ces dernières, la priorité était donnée à l'énergie solaire et aux bioénergies. L'hydrogène et les piles à combustible bénéficiaient de 6 % des financements, soit un niveau comparable à celui de 2006-2007.

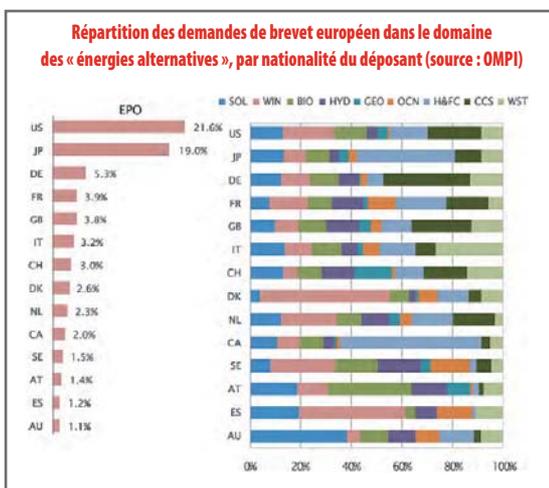
Il faut souligner à ce stade que le tournant pris aux alentours de l'an 2000 a été constaté dans l'ensemble des pays développés. Les budgets publics dédiés à la R&D dans le domaine de l'énergie sont repartis à la hausse, leur part relative dans les budgets

R&D totaux ayant néanmoins tendance à stagner. Actuellement, le budget français est en volume le troisième budget, derrière ceux du Japon et des États-Unis.



On peut également noter que les budgets consacrés aux énergies fossiles, à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables sont en moyenne sensiblement comparables. En revanche, l'hydrogène et les piles à combustibles bénéficient d'un budget équivalant à environ la moitié de celui consacré à chacune de ces filières. Bien entendu, cette structure varie fortement d'un pays à l'autre : ainsi, le Japon, la Corée et le Canada consacrent la plus grande part de leur budget au nucléaire, alors que les budgets les plus significatifs dédiés au charbon se trouvent aux États-Unis et en Australie. La Chine, quant à elle, a choisi de concentrer son soutien sur les filières du solaire et de l'éolien.

Ces éléments ne donnent néanmoins qu'une vue partielle de la situation, puisqu'il manque des données sur les dépenses en R&D des entreprises. De ce point de vue, les données sur les demandes de brevets permettent de dresser un tableau plus large. L'OMPI a ainsi effectué un recensement des brevets dans le domaine des technologies de l'énergie « alternatives », sur une période relativement longue (1978-2005). N'apparaissent donc pas dans ce décompte les demandes de brevet dans le domaine du nucléaire et des énergies fossiles.



S'agissant des demandes de brevet européen, la France arrive globalement en quatrième position, derrière les États-Unis, le Japon et l'Allemagne.

Au niveau de la répartition entre filières, on peut noter que la France ne possède pas de spécialisation réellement marquée, à l'inverse de ce que l'on observe dans le cas du Japon avec l'hydrogène et les piles à combustible, du Canada également sur cette filière, du Danemark avec l'éolien, de l'Allemagne avec le captage et le stockage de CO<sub>2</sub>, de l'Autriche avec la biomasse, ou encore de l'Australie avec le solaire. Cette absence de spécialisation marquée se retrouve aussi aux États-Unis, mais ceci s'applique à un volume de brevets cinq fois plus important, ce qui peut autoriser une relative « dispersion » entre les différentes filières.

La France possède un savoir-faire indéniable dans le domaine du nucléaire et des hydrocarbures. S'agissant des « nouvelles » filières, qui ont connu entre 1986 et 2000 une période de relative mise en sommeil, l'enjeu est d'être en mesure de se positionner rapidement, du moins dans le cas des filières n'ayant pas encore atteint un degré de maturité technologique suffisant et pour lesquelles, du point de vue des acteurs, le paysage international n'est pas encore très structuré. Le jeu est ainsi relativement ouvert dans des filières tout juste émergentes dans lesquelles les options sont encore ouvertes, telles que le captage et le stockage de CO<sub>2</sub>, ou bien les énergies marines ; dans des filières déjà bien structurées, telles que le solaire photovoltaïque, l'enjeu réside dans la capacité à se positionner sur les nouvelles générations. Enfin, dans des filières telles que l'éolien ou les piles à combustibles, on peut penser que la France pourra se positionner parmi les outsiders.

Les orientations en matière de R&D publique dans le domaine de l'énergie connaissent par ailleurs des évolutions structurelles profondes. Des réflexions ont notamment été initiées par le rapport sur les « nouvelles technologies de l'énergie » (2004) et le rapport sur la « stratégie nationale de recherche dans le domaine énergétique » (SNRE, 2007), qui a fait lui-même l'objet d'une évaluation par l'OPECST en 2009. Le contexte français a récemment été marqué, entre autres, par la mise en place de l'Alliance nationale pour la coordination de la recherche sur l'énergie (Ancre), dont les membres fondateurs sont le CEA, le CNRS et l'IFP Énergies nouvelles, ainsi que par l'instauration d'un fonds démonstrateur de recherche géré par l'Ademe, destiné à la réalisation de prototypes à une échelle suffisamment représentative préfigurant le stade industriel. Doté d'un budget de 375 M€ sur la période 2009-2012, il concerne des thèmes tels que les véhicules décarbonés, les biocarburants de deuxième génération, le captage et le stockage de CO<sub>2</sub>, les énergies marines ou les réseaux du futur. Ces filières occupent également une place de choix au sein des « investissements d'avenir », avec des crédits dédiés aux démonstrateurs « énergies renouvelables et chimie verte » (1,35 Md€), à la création d'instituts d'excellence en matière d'énergies décarbonées (1 Md€) ainsi qu'au soutien au nucléaire de demain (1 Md€). Enfin, des travaux pilotés par l'Ademe sous l'égide des ministères en charge de l'énergie et de la recherche ont récemment été initiés afin de qualifier et hiérarchiser plus finement les orientations de recherche de la SNRE.



## Recommandations

Une impulsion nouvelle a été donnée aux évolutions dans le domaine de l'énergie suite aux travaux menés dans le cadre du Grenelle de l'environnement. Si certaines dispositions qui ont ensuite été adoptées ont un effet à court terme (retrait des ampoules à incandescence, par exemple), d'autres ont vocation à avoir des effets structurants à plus long terme, avec en particulier des conséquences sur les technologies du domaine de l'énergie en cours de développement ou émergentes. En dehors des mesures spécifiques au bâtiment ou aux transports, on peut citer en particulier :

- la programmation pluriannuelle des investissements (PPI) de production d'électricité et de chaleur (arrêtés du 15 décembre 2009), qui fixe des objectifs en terme de capacités de production à horizon 2020. Par exemple, dans le cas de l'électricité, le solaire devra contribuer à hauteur de 5,4 GW (contre 110 MW en 2008), l'éolien terrestre à hauteur de 19 GW (contre 3,5 GW en 2008) et l'éolien offshore (ainsi que les énergies marines) à hauteur de 6 GW ;
- la création du Comité stratégique des éco-industries (Coséi), lequel a mis en place en son sein un groupe de travail dédié à l'innovation et à la diffusion des éco-technologies.

Face à ces objectifs, la première question qui se pose est celle de la capacité du tissu industriel français de contribuer, à terme, à l'atteinte de ces objectifs, que ce tissu exploite des technologies « tricolores » (existantes ou à développer) ou soit composé en partie d'implantations de grands groupes internationaux installant des capacités de production dans l'Hexagone : dans les deux cas, le bilan en termes d'emplois est positif. L'analyse ne peut toutefois être purement franco-française : dans un certain nombre de cas, les enjeux, en termes de débouchés, sont avant tout internationaux.

Dans ce contexte, plusieurs priorités émergent :

- assurer une bonne cohérence entre les orientations de la politi-

que énergétique nationale, les actions des collectivités, les priorités définies au sein des pôles de compétitivité, la capacité (et la volonté) des filières industrielles françaises et les choix technologiques, tels qu'ils transparaissent dans la répartition du soutien public à la R&D ;

- créer des conditions favorables au développement pérenne des filières, comme le fait de disposer, au niveau des acteurs, d'une visibilité suffisante à moyen-long terme. Dans le domaine de l'énergie, cela concerne en particulier la fiscalité, les tarifs réglementés d'achat de l'électricité (dans le cadre de l'obligation d'achat), ainsi que les prescriptions technologiques dans les achats publics et les normes internationales ;
- opérer des choix clairement assumés.

Concernant ce dernier point, on peut remarquer que la stratégie nationale de recherche et d'innovation (SNRI) a retenu quatre « domaines clés » pour l'énergie : le nucléaire, le solaire photovoltaïque, les biocarburants de deuxième génération et les énergies marines. Ceux-ci sont complétés, au nom de leur contribution potentielle à la lutte contre le changement climatique, par le stockage du CO<sub>2</sub>, la conversion de l'énergie (dont les piles à combustible) et l'hydrogène.

Le rapport de l'OPECST sur la SNRE avait toutefois souligné la nécessité de définir des priorités qui soient à la fois validées au plus haut niveau politique, et sélectionnées sur la base de critères de choix explicites, l'objectif étant d'opérer un classement entre, d'un côté, les « paris technologiques », avec comme ambition de se positionner parmi les leaders mondiaux, et, à l'autre extrême, les thèmes pour lesquels le maintien d'une veille technologique est considéré comme suffisant. Les débats menés autour de la SNRE, ceux menés dans le cadre de l'Ancre, ainsi que, dans le cadre du présent exercice, la présentation d'une sélection de 17 technologies clés du domaine de l'énergie, amorcent des pistes de réflexion dans ce sens, qu'il serait souhaitable d'approfondir.



# 41. Carburants de synthèse issus de la biomasse

## Description

Les technologies de production de biocarburants dits de « deuxième génération » sont de deux types :

- la production par voie thermo-chimique, qui consiste à gazéifier la biomasse, puis à purifier le gaz de synthèse ainsi produit et le convertir en carburants liquides (de type Diesel ou Jet Fuel) via des procédés catalytiques ;
- la production par voie biochimique, qui consiste à traiter la biomasse par voie enzymatique, puis à procéder à une fermentation éthanolique.

Ces technologies sont plus particulièrement destinées à la production de biocarburants à partir de biomasse ligno-cellulosique (bois, plantes à croissance rapide, résidus forestiers, etc.).

Les efforts actuels dans ce domaine se concentrent sur les opérations de démonstration, c'est-à-dire sur des pilotes préfigurant la production au stade industriel. Plusieurs verrous restent cependant à lever, qui concernent notamment :

- la purification du gaz de synthèse et sa valorisation à des niveaux moindre de pureté (four verrier,...) ;
- la mise au point de nouvelles enzymes ;
- en amont, la logistique (filières d'approvisionnement).

La « troisième génération », quant à elle, repose sur l'exploitation de la biomasse marine, essentiellement les microalgues, espèces de grande productivité cultivées en masse sur des salines ou encore en photobioréacteurs. Les verrous technologiques portent sur la culture intensive, l'insertion dans l'environnement, l'optimisation de l'extraction des huiles pour la production de biocarburants, ou de la conversion par gazéification. Les perspectives industrielles sont, au mieux, à horizon de dix ans.

## Applications

Ces technologies sont dédiées à la production de carburants pour le secteur des transports (terrestres et aériens). Elles sont donc développées en collaboration avec les utilisateurs en aval (constructeurs). Une nouvelle filière

requérant des gaz de synthèse de moindre pureté (four verrier par exemple) est en développement.

Ce sont des technologies relativement complexes, qui mobilisent de multiples compétences :

- conception et fabrication de réacteurs (chaudronnerie) ;
- génie chimique et biochimique (procédés de purification, procédés catalytiques, solvants supercritiques...);
- modélisation complexe des procédés ;
- contrôle et commande de procédé, capteurs ;
- traitement des effluents ;
- logistique ;
- procédés de prétraitement de la biomasse ;
- évaluation des impacts environnementaux des cultures et des impacts socioéconomiques.

Les futurs sites devraient consommer de l'ordre de 1 million de tonnes par an de biomasse chacun ; à titre de comparaison, l'IFP Énergies nouvelles évalue à 47 millions de tonnes la ressource française (bois et paille) potentiellement mobilisable. Cette production contribuera à l'atteinte des objectifs d'incorporation de biocarburants dans le secteur des transports, tels qu'ils ont été fixés par la directive européenne 2003/30 puis renforcés par le gouvernement français.

## Enjeux et impacts

Le secteur des transports est directement concerné par la mise en place d'une filière de production de biocarburants de deuxième génération. Elle contribuera à l'indépendance énergétique de l'Europe, à travers une meilleure exploitation des ressources en biomasse.

Par ailleurs, cette filière devrait bénéficier d'une meilleure acceptabilité que la première génération de biocarburants, qui est en concurrence avec les usages alimentaires. À plus long terme, toutefois, si les cultures énergétiques destinées à alimenter les filières « deuxième génération » devaient se développer, des tensions pourraient se manifester au niveau de l'usage des sols (terres arables, en particulier).



## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : CEA, Cirad, CNRS, Ensic, IFP Énergies nouvelles, Ifrmer, Inra, UTC
- **Industrie** : Air Liquide / Lurgi, ARD, Axens, Lesaffre, Maguin, Naskeo, Roquette, Biocar (GDF-Suez), Total
- **Pôles de compétitivité** : Capenergies, Derbi, IAR, Pôle Mer, Pôle Paca, Trimatec

### Principaux acteurs étrangers

- Abengoa, Biogasol, BTG, Chemrec Ab, Choren, Enerkem, FZK, Genencor, Novozymes, Sekab, Shell, Solazyme, Synthetic Genomics, TNO, Tub-F, Uhde, VTT

## Position de la France

Les programmes de soutien à la R&D engagés depuis quelques années ont permis de mobiliser un nombre d'acteurs significatif. Des projets de démonstration sur la deuxième génération sont lancés ou en cours d'évaluation :

- pilote sur le site de Bure-Saudron en cours d'étude sur la voie thermo-chimique (CEA, Air Liquide, Choren, Cnim...);
- fonds démonstrateurs géré par l'Ademe : production de biométhane par gazéification (GDF Suez) et projet de pilote sur la voie de biochimique, BioTFuel (CEA, IFP Énergies nouvelles, Sofiproteol et Total);
- plateforme d'innovation bioraffinerie recherches et innovations, Marne (labellisée par le pôle IAR), au sein duquel sera développée Futurool, éthanol de deuxième génération.

Par ailleurs, certaines compétences clés sont bien représentées en France : par exemple les procédés catalytiques, que ce soit au niveau académique ou industriel.

La France ne dispose toutefois pas d'une masse critique d'acteurs comparable à celle de la région de Freiberg, en Allemagne, sur la voie thermo-chimique. Aux États-Unis, l'importance des programmes de recherche dédiés à l'éthanol cellulosique a permis à ce pays d'être très en avance dans ce domaine.

Pour les biocarburants de troisième génération, plusieurs pôles de compétitivité coopèrent afin de contribuer à l'élaboration d'une filière des microalgues industrielles.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Soutien public à la R&D.
- Maîtrise de certaines étapes-clés des procédés.
- Potentiel de ressources exploitables (biomasse ligno-cellulosique, biomasse marine).

### Faiblesses

- Lancement tardif de projets de pilotes de démonstration.
- Faible degré de structuration des filières d'approvisionnement.

### Opportunités

- Augmentation du coût des carburants d'origine fossile.
- Demande des secteurs automobile et aéronautique.

### Menaces

- Opérations pilotes de démonstration plus avancées ailleurs en Europe et aux États-Unis, avec d'ores et déjà des retours d'expérience.
- Concurrence de la part de pays disposant de masses critiques de compétences : Allemagne (voie thermo-chimique) et États-Unis (voie biochimique).

## Recommandations

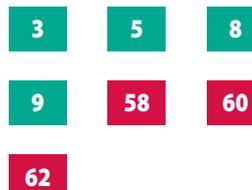
Dans une approche globale, il s'agit de compléter les aspects technologiques par des travaux en matière de bilans économiques (analyse fine des coûts de production prévisionnels, intégrant l'amont), de bilans environnementaux, de scénarios de mobilisation de la ressource...

De plus, il sera nécessaire de coupler les objectifs en matière d'incorporation de biocarburants dans les carburants pour l'automobile avec le potentiel de biomasse disponible, en tenant compte des arbitrages nécessaires (conflits d'usage). On peut souligner au passage que ce potentiel ne pourra être mobilisé qu'à condition que les filières d'approvisionnement se structurent.

Par ailleurs, afin de diversifier les usages, le développement de la « bioraffinerie » doit être soutenu : cette approche intégrée combine sur une même plateforme différents modes de valorisation de la biomasse (biocarburants et valorisation matière).

Enfin, il est nécessaire de poursuivre et de concentrer les investissements dans un nombre limité de projets de démonstration. Ces projets permettront de plus aux sous-traitants (ingénierie, chaudronnerie, instrumentation...) d'acquiescer les compétences nécessaires pour se positionner sur ces nouveaux marchés.

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 42. Solaire thermodynamique

### Description

Le principe du solaire thermodynamique (ou thermique à concentration - STC) consiste à collecter et à concentrer l'énergie solaire de façon à produire de la chaleur, puis à convertir celle-ci en électricité via un cycle thermodynamique (une ou deux boucles avec un fluide en circulation, couplées à une turbine).

Les installations de production d'énergie basées sur ce principe se répartissent en trois catégories :

- les centrales à tour, dans lesquelles les capteurs (miroirs) réfléchissent le rayonnement solaire vers un récepteur central placé au sommet d'une tour ; la centrale française Thémis (inaugurée en 1983) en est un exemple historique ;
- les centrales à capteurs linéaires, dans lesquelles le rayonnement est concentré vers un tube récepteur parallèle aux capteurs, et à l'intérieur duquel circule un fluide caloporteur ; il en existe deux versions : les capteurs de type cylindro-parabolique (en référence à la forme des miroirs) ; les capteurs de type Fresnel, qui consistent en un assemblage de miroirs plats longitudinaux disposés parallèlement mais inclinés différemment ; dans tous les cas, la géométrie adoptée permet d'obtenir l'effet de concentration ;
- les centrales de type parabole-Stirling, dans lesquelles chaque miroir parabolique est équipé d'un moteur Stirling au niveau duquel le rayonnement est concentré.

La faisabilité technique de ce type de système est déjà en partie démontrée mais il subsiste toutefois plusieurs verrous technologiques à lever :

- de façon générale, les rendements doivent être encore améliorés, par exemple en augmentant le facteur de concentration du rayonnement solaire, ou en utilisant un fluide caloporteur fonctionnant à plus haute température ;
- les cycles de fonctionnement peuvent être optimisés de façon à maximiser la production d'électricité en fonction des périodes diurnes-nocturnes ; une solution consiste à coupler le système à un stockage de chaleur performant, sachant par ailleurs qu'aucune solution de stockage n'est à l'heure actuelle réellement satisfaisante.

### Applications

Le regain d'intérêt pour le STC après plusieurs programmes de R&D durant les années 80, date d'une dizaine d'année.

À ce jour, le marché du STC est encore embryonnaire ; on comptait fin 2009 l'équivalent de 710 MW installés et en fonctionnement dans le monde (source AIE). Actuellement, les annonces de projet représentant l'équi-

valent de plusieurs centaines de MW de capacité supplémentaire par an se multiplient.

Le marché est aujourd'hui dominé par les industriels américains, allemands et espagnols. Plusieurs acteurs français essaient activement de se positionner sur ce marché, soit par des développements menés en propre (CNIM, Solar Euromed), soit par des acquisitions, comme dans le cas d'Areva avec le rachat d'Ausra, ou d'Alstom (participation significative dans BrightSource Energy).

### Enjeux et impacts

La filière STC a développé plusieurs démonstrateurs en fonctionnement. Selon les projections de l'AIE, le STC pourrait fournir jusqu'à 10 % de l'électricité au niveau mondial à l'horizon 2050.

Le STC est plus particulièrement adapté aux régions à fort ensoleillement, dans des zones pouvant accepter de grandes emprises foncières : les zones désertiques ou semi-désertiques des États-Unis, d'Afrique du Nord, du Moyen-Orient... sont potentiellement les plus prometteuses. À titre d'illustration, le Plan solaire méditerranéen, qui est un des projets phares de l'Union pour la Méditerranée, portée par la France, constitue un cadre très favorable au développement du solaire pour la production d'électricité (y compris par la filière STC), avec un objectif ambitieux de 20 GW (toutes filières confondues) mis en service d'ici à 2020.

Pour les acteurs français, les principaux enjeux économiques se situent donc à l'export. Ils peuvent aussi se positionner sur certains composants clés, tels que les réflecteurs.

Bien qu'associé à l'image « verte » du solaire, le STC peut rencontrer quelques difficultés d'acceptabilité. Le principal obstacle résulte de l'emprise au sol nécessaire, ce qui l'exclut des zones urbanisées et des zones agricoles. De fait, ce type de centrale pourrait être implanté majoritairement loin des zones de consommation d'énergie, ce qui implique le développement d'infrastructures de transport de l'électricité adéquates. Par ailleurs, certaines des filières présentent des risques industriels spécifiques : ainsi, certains cycles utilisent comme fluide caloporteur des huiles qui présentent des dangers en cas d'accident ; des systèmes de stockage mettent en œuvre de grandes quantités de nitrates (sous forme de sels fondus), lesquels présentent des risques d'explosion. Ces limites sont toutefois bien connues, et des alternatives existent, comme l'utilisation de vapeur d'eau comme fluide caloporteur.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : Armines, CEA/Ines, Promes
- **Industrie** : Alstom, Areva, Cnim, Saint Gobain, Solar Euromed
- **Pôles de compétitivité** : Capenergies, Derbi

### Principaux acteurs étrangers

- Abengoa, Acciona, E-solar, Novatec Biosol, Siemens, Solar Millenium, Stirling Energy Systems...

## Position de la France

Le cumul d'expérience qui avait été acquis avec la centrale Thémis n'a pas été entièrement perdu : il subsiste des compétences académiques, mobilisables pour les aspects les plus fondamentaux (transferts thermiques, cycles thermodynamiques...). Une filière industrielle reste donc à construire, un rattrapage technologique étant par ailleurs susceptible d'être effectué rapidement.

Par ailleurs, la France dispose de l'essentiel des compétences techniques à mobiliser pour de tels projets, en particulier des compétences en ingénierie d'installations complexes (Technip) pour la production d'électricité et de chaleur ou encore sur les technologies de miroirs (Saint Gobain).

## Analyse AFOM

### Atouts

- Mobilisation active d'acteurs industriels.
- Capacité à répondre à des appels d'offres internationaux.

### Faiblesses

- Absence de marché intérieur susceptible de servir de « vitrine » à l'international.
- Démarrage tardif des projets nationaux.

### Opportunités

- Besoins en électricité de pays en voie de développement à fort ensoleillement.
- Grands programmes internationaux, tels que le projet DII GmbH (précédemment Desertec) qui doit faire l'objet d'une analyse d'ici à 2012 ou le Plan solaire méditerranéen.

### Menaces

- Dépendance technologique sur certains composants critiques, tels que le tube récepteur.
- Concurrence de plusieurs grands groupes internationaux.

## Recommandations

L'enjeu principal, pour la France, est la capacité à élaborer une offre suffisamment solide, en mesure de prendre des parts de marché sur les marchés internationaux qu'il serait souhaitable de ne pas aborder en ordre dispersé. Ces nouveaux marchés constituent également une opportunité pour la constitution d'un tissu de PME sous-traitantes, indispensables pour la fourniture d'une partie des multiples composants nécessaires à la construction des centrales STC.

### Liens avec d'autres technologies clés

6

7

#### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

#### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

#### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 43. Énergies marines

### Description

Les technologies des énergies marines visent spécifiquement les énergies renouvelables issues des ressources de la mer, hors énergie éolienne en mer.

À la différence de la plupart des autres technologies clés, il s'agit d'un ensemble de technologies relativement hétérogène, s'appuyant sur des principes physiques différents et caractérisé par la source d'énergie exploitée :

- l'énergie des courants marins qui consiste à tirer parti de l'énergie cinétique des courants et des courants côtiers dus à la marée par des hydroliennes qui transforment l'énergie cinétique en énergie électrique ;
- l'énergie houlomotrice, qui consiste à transformer l'énergie des vagues au moyen de convertisseurs d'énergie en énergie électrique par diverses techniques : colonne d'eau oscillante, rampe de franchissement, flotteur vertical, flotteur articulé ;
- l'énergie thermique qui consiste à exploiter les différences de température entre la surface et les profondeurs, essentiellement dans les zones tropicales, pour produire de l'électricité, de l'eau douce, du froid pour la climatisation et des produits dérivés pour l'aquaculture. De rendement faible, elle suppose la mise en place d'infrastructures lourdes ;
- la pression osmotique qui utilise les différences de concentration en sel en interposant des membranes semi-perméables et l'électrodialyse inversée, notamment au niveau de l'estuaire des fleuves ;
- l'énergie marémotrice qui consiste à exploiter l'énergie potentielle de la marée liée elle-même à une différence de niveau entre deux masses d'eau ;

La maturité des technologies est très variable, l'énergie marémotrice, houlomotrice et les courants sont les plus avancées, avec quelques installations marémotrices commerciales dans le monde, des sites pilotes pour les énergies hydroliennes et houlomotrices. L'énergie thermique et la pression osmotique doivent encore faire l'objet de développement. L'usage industriel des technologies les plus avancées citées pourrait intervenir à un horizon de cinq ans.

Selon l'énergie considérée, il existe différentes familles de technologies qui ne présentent pas forcément les mêmes types de verrous technologiques. Dans tous les cas, il s'agit de prendre en compte un environnement soumis à des conditions sévères de vent, vagues, courants, salinité, etc. Les verrous peuvent être classés par groupes fonctionnels :

- conception mécanique et fabrication : fabrication et assemblage de structures marines de grande envergure et application de matériaux alternatifs (béton, composite) pour des coques économiques et durables ;

- conception électrique : ancrages et câbles électriques, systèmes de connexion électrique en milieu marin, connexions tournantes ;
- installation en milieu marin : mise à l'eau simplifiée de structures de plusieurs centaines de tonnes, méthode de remorquage et de mise à poste, installation et assemblage des ensembles en milieu marin ;
- ancrage adapté au sol : de types classique (navire), gravitaire, pieux enfoncés dans le sol ;
- contrôle commande des machines ou des parcs de machines : pour optimiser la production d'énergie et limiter les efforts mécaniques ;
- convertisseurs d'énergie : dimensionnement du stockage de l'énergie, comportement des machines et composants en mer, fatigue ;
- raccordement électrique : comportement dynamique du câble, diminution des pertes électriques, optimisation ;
- exploitation et maintenance : moyens d'accès en toute sécurité, survie en conditions extrêmes ;
- démantèlement afin de restituer le site, après exploitation, dans un état le plus proche possible des conditions initiales.

### Applications

La principale application visée est la production d'électricité. Les autres champs d'application sont la production de froid pour la climatisation et les produits dérivés pour l'aquaculture.

La majeure partie des capacités installées sont de type marémotrice, avec trois usines marémotrices dans le monde représentant 270 MW de capacité installée en 2008, dont celle de la Rance (240 MW), construite en 1960. Les énergies marines [source : association European Ocean Energy] pourraient totaliser 3,6 GW de capacité en 2020, représentant 26 000 emplois directs pour un investissement d'environ 8,5 Md€. La France représente 0,8 GW dans ce scénario.

### Enjeux et impacts

Grâce à son littoral, la France dispose d'une zone maritime de 11 millions de km<sup>2</sup>, dont elle contrôle l'exploitation et au sein de laquelle la production d'électricité pourrait se développer.

Des interrogations subsistent quant à l'intégration dans le milieu du point de vue environnemental et anthropique. Les énergies marines devront en particulier démontrer qu'elles ne perturbent pas les écosystèmes marins.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : École centrale de Nantes, Ensieta, Ifremer, INP Grenoble
- **Industrie** : Alstom, DCNS, EDF EN, GDF-Suez, Geocan, Oceanide, Sabella, Saipem, Technip
- **Pôles de compétitivité** : Capenergies, Pôle Mer Bretagne Pôle Mer Paca, Tenerrdis

### Principaux acteurs étrangers

- Iberdrola, SAIPEM, Statkraft, Marine Current Turbine, Pelamis, Sapphyre, Voith Siemens, Wave Dragon

## Analyse AFOM

### Atouts

- Un large territoire maritime.
- Installation en cours d'hydroliennes à Paimpol-Bréhat, 6 MW, par EDF.
- Initiative Ipanema visant à favoriser l'émergence d'une filière complète.

### Faiblesses

- Environnement juridique et administratif complexe.
- Tarif d'achat de l'énergie peu incitatif.

### Opportunités

- Possibilités de participation active à des projets de coopération à l'international.

### Menaces

- Un impact environnemental mal cerné, avec des conflits d'usage possibles.
- Financements nécessaires élevés, donc difficiles à mobiliser, pour des perspectives s'inscrivant dans le long terme.

## Recommandations

Les perspectives de développement des énergies marines s'inscrivent dans le long terme. À ce titre, il est nécessaire de maintenir un effort de R&D régulier sur une longue durée (horizon 2020), incluant la mise au point de démonstrateurs. Les investissements doivent être prévus en fonction de la capacité à industrialiser des acteurs privés.

Plusieurs des pistes explorées représentent des ruptures technologiques, pour lesquelles la France est en position d'affirmer une ambition industrielle.

## Liens avec d'autres technologies clés

49

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



## 44. Piles à combustible

### Description

Une pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse : elle permet de produire de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène. Le seul produit direct de la conversion est de la vapeur d'eau.

De façon schématique, une pile à combustible comprend une anode, au niveau de laquelle l'hydrogène est introduit, une cathode, au niveau de laquelle l'oxygène est introduit, ces deux électrodes étant séparées par un électrolyte, par lequel transitent les porteurs de charge.

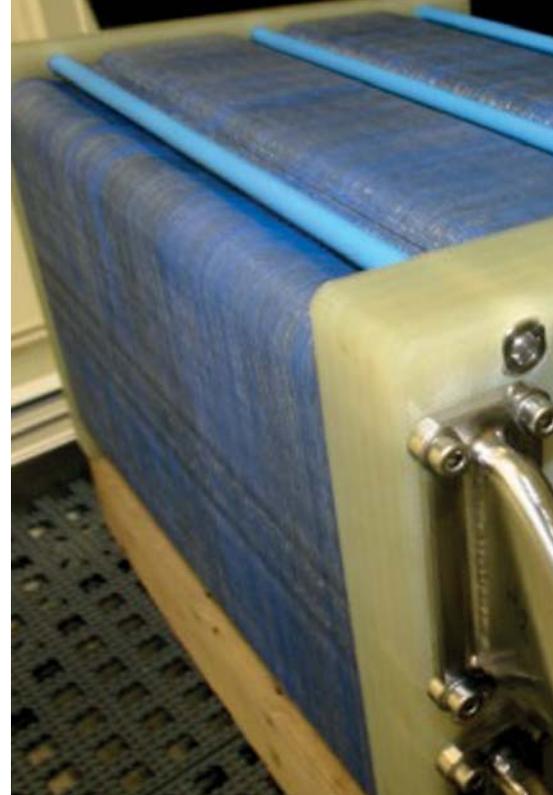
Les différents types de pile à combustibles se distinguent par la nature des électrodes et surtout de l'électrolyte utilisé. Pour des applications stationnaires, les principaux sont les suivants :

- PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), qui se caractérise par l'utilisation d'une membrane polymère comme électrolyte ;
- SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*), dont l'électrolyte est en céramique (zircon) ;
- PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*) et MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*), dont l'électrolyte (respectivement l'acide phosphorique et des carbonates) est solide à température ambiante, mais liquide à la température de fonctionnement de la pile.

Chacune de ces piles fonctionne à des températures plus ou moins élevées : 70-150°C pour les PEMFC, 180-220°C pour les PAFC, 600-660°C pour les MCFC et 700-1000°C pour les SOFC. On peut noter au passage que la chaleur contenue dans la vapeur d'eau produite peut être récupérée (cogénération). Un fonctionnement à température élevée permet d'accélérer la réaction hydrogène-oxygène, mais impose d'utiliser des matériaux adaptés ; pour un fonctionnement à température plus basse, le recours à un catalyseur (en général, du platine) est nécessaire.

Malgré les efforts consacrés à cette famille de générateurs, plusieurs verrous technologiques freinent leur diffusion à plus grande échelle :

- sensibilité aux impuretés présentes dans les gaz qui alimentent la pile (composés soufrés, en particulier) ;
- mise au point de matériaux et de composants susceptibles de fonctionner à haute température (SOFC) et/ou en milieu agressif (MCFC) ;
- recherche d'alternatives afin de limiter les risques d'approvisionnement : catalyseurs (alternative au platine, dont les ressources sont limitées), membranes polymères (alternative au principal fournisseur américain actuel) ;
- réduction du temps nécessaire au démarrage pour les piles fonctionnant à haute température ;
- augmentation de la durée de vie.



### Applications

En dehors des applications spatiales, les premiers modèles de pile à combustible ont été mis sur le marché au début des années 1990. À ce jour, toutefois, très peu de produits ont atteint une réelle maturité commerciale.

En 2008, les ventes mondiales de piles à combustible pour applications stationnaires ont été de l'ordre de 2 250 unités, contre environ 250 en 2001. Il s'agissait principalement (plus de 90 %) de PEMFC de petite puissance (moins de 10 kW) ; les puissances plus élevées (50 unités vendues en 2008) sont dominées par les PAFC et les MCFC.

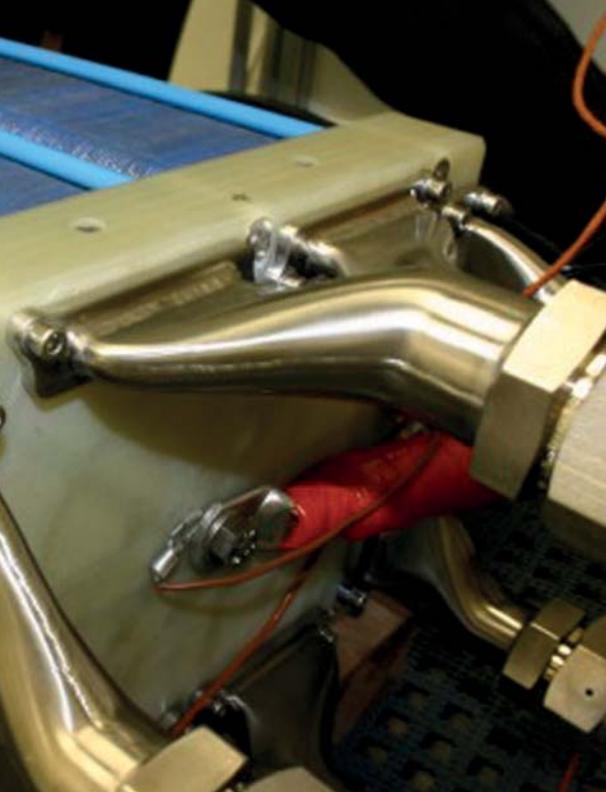
Il est délicat de prédire quel sera à l'avenir la taille du marché des piles à combustible, tant les estimations passées se sont révélées hasardeuses. Pour les applications stationnaires, les deux segments principaux seraient les suivants :

- les installations de production décentralisée, de quelques centaines de kW, éventuellement utilisées en cogénération : hôpitaux, immeubles tertiaires, habitat collectif... ;
- les unités de petite puissance, qui peuvent également s'adresser au secteur résidentiel-tertiaire, dont certaines applications spécifiques : installations de secours, alimentation de sites isolés, microcogénération...

Un autre usage possible serait le stockage tampon de l'électricité : celle-ci serait utilisée pour produire de l'hydrogène, lequel serait stocké puis utilisé ultérieurement pour alimenter une pile à combustible.

La tendance observée depuis une dizaine d'années est nettement une croissance de ce marché, principalement pour les unités de petite puissance. Cette croissance régulière devrait se poursuivre dans les prochaines années, sans toutefois s'accélérer à court terme, le coût des piles à combustible restant élevé (entre 6 000 et 10 000 € le kW), avec une durée de vie encore trop limitée.

D'autres types d'applications sont expérimentés : transports (production d'électricité embarquée à bord d'un véhicule) et appareils électriques portables.



## Enjeux et impacts

Actuellement, la plupart des installations en service sont alimentées en gaz naturel, en l'absence d'une infrastructure de distribution d'hydrogène adéquate. Le gaz naturel est lui-même transformé par « reformage » avant d'être injecté, opération qui a pour conséquence l'émission de CO<sub>2</sub>. Un fonctionnement en mode réellement « décarboné » nécessitera l'avènement d'une économie de l'hydrogène, qui s'inscrit dans une perspective à long terme.

Par ailleurs, le fonctionnement en cogénération (production d'électricité et de chaleur) permet d'améliorer l'efficacité énergétique (secteur résidentiel-tertiaire dans le cas présent).

La pile à combustible bénéficie d'une image positive : en première approche, il n'y a pas d'émissions polluantes, seulement de la production d'eau. Toutefois, les risques liés à l'utilisation de l'hydrogène (même s'ils ne sont pas fondamentalement différents de ceux liés au gaz naturel), le coût élevé de la technologie et sa diffusion sans cesse repoussée pourraient limiter son usage à quelques applications de niches.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : CEA, IRCELyon, LEMTA, LEPMI... ;
- **Industrie** : Axane (Air Liquide), Dalkia (Veolia), EDF, GDF Suez, Helion (Areva)...
- **Pôles de compétitivité** : Astech, Capenergies, Derbi, Pôle « Véhicule du Futur », Tenerrdis, S2E2

### Principaux acteurs étrangers

- Ansaldo Fuel Cells, Ballard, Fuelcell Energy, Hexis, Hydrogenics, NGK Insulators, P21, Plug Power, Topsoe Fuel Cell, Toshiba, UTC Power...

## Position de la France

La filière industrielle française des piles à combustibles est encore émergente. Elle comprend pour l'essentiel deux filiales de grands groupes positionnés ou souhaitant se positionner sur l'hydrogène. Au niveau international, les principaux acteurs sont nord-américains (États-Unis et Canada), lesquels bénéficient d'un cumul d'expérience de plus de vingt ans et sont donc technologiquement plus avancés, et, dans une moindre mesure, japonais et européens.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Mise en réseau des acteurs (réseau PACo puis plateforme HyPaC).
- Complémentarité des compétences industrielles et académiques.
- Continuité du financement public de la R&D (programmes PAN-H puis HPAC de l'ANR).

### Faiblesses

- Nombre relativement limité d'entreprises impliquées.

### Opportunités

- Progression régulière des ventes annuelles au niveau mondial.
- Couplage avec le développement des technologies de l'hydrogène.

### Menaces

- Avance technologique nord-américaine et japonaise.
- Difficultés d'approvisionnement pour certains matériaux et composants.
- Programmes de démonstration dans le résidentiel déjà en place au Japon et en Allemagne.

## Recommandations

Les recherches menées ces dernières années doivent être poursuivies par les organismes de recherche afin de préparer les technologies de rupture et en développant encore le partenariat public-privé. Des projets de démonstration doivent être appuyés dans une logique de multiplication des applications.

## Liens avec d'autres technologies clés

5

45

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 45. Technologies de l'hydrogène

### Description

L'utilisation de l'hydrogène comme nouveau vecteur énergétique suppose de maîtriser l'ensemble des maillons de la chaîne : production, stockage, transport et distribution.

L'hydrogène est d'ores et déjà produit de façon industrielle par reformage du gaz naturel ou d'hydrocarbures liquides, ainsi que par gazéification du charbon ; leur principal inconvénient est de produire de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. Des alternatives sont néanmoins possibles : l'électrolyse basse température, encore limitée par son faible rendement et son coût ; la gazéification de la biomasse, couplée à une purification et une séparation du gaz de synthèse ; l'électrolyse haute température-haute pression, encore expérimentale ; la dissociation thermochimique de l'eau, également expérimentale, et qui suppose de disposer une source de chaleur à haute température (plus de 850°C) et en grande quantité.

Le stockage de l'hydrogène pose des problèmes spécifiques, dû à sa faible densité et à sa tendance à migrer à travers les matériaux. Il peut être stocké sous forme gazeuse dans des conteneurs sous très haute pression, ou bien sous forme liquide (stockage cryogénique) ; une alternative consiste à stocker l'hydrogène dans un matériau solide (hydrures métalliques, par exemple). Ces modes de stockage sont encore limités pour des raisons de coût, de rendement énergétique et/ou d'encombrement.

Enfin, du point de vue du transport et de la distribution, plusieurs options sont ouvertes, avec des modes d'organisation différents selon que la production est centralisée ou sur site ; le transport peut être effectué par un véhicule dédié ou via un réseau (canalisations). Durant le transport, l'hydrogène peut lui-même être stocké dans un conteneur de grande capacité, ou dans des cylindres ou cartouches, ces derniers étant livrés à l'utilisateur final. D'un point de vue logistique, de multiples organisations sont techniquement possibles, mais nécessitent d'être optimisées.

En aval, l'hydrogène peut alimenter une pile à combustible destinée à produire électricité et chaleur.

### Applications

Le développement d'infrastructures dédiées à l'hydrogène sera lié à son utilisation dans trois secteurs principaux :

- production d'énergie (électricité et chaleur) dans des installations stationnaires ;
- véhicules à piles à combustible (avec stockage embarqué d'hydrogène) ;
- applications portables (appareils électriques).

Les enjeux se situent essentiellement au niveau des deux premiers secteurs, qui nécessitent une production d'hydrogène suffisante et une logistique en conséquence.

Actuellement, la consommation d'hydrogène mondiale est d'environ 57 Mt/an (dont 8 Mt en Europe), soit 630 milliards de Nm<sup>3</sup>. Il est produit quasi-exclusivement à partir de ressources fossiles, et est destiné à 85 % au raffinage de produits pétroliers et à la production d'ammoniac. Cette production, si elle était utilisée à des fins énergétiques, ne représenterait que 1,7 % de la consommation d'énergie primaire au niveau mondial (source : association AFH2) ; il faudrait donc que la production d'hydrogène gagne un ordre de grandeur pour que ce vecteur énergétique puisse occuper une place significative dans le bilan énergétique. Ce scénario n'a toutefois de sens que dans la mesure où la technologie des piles à combustible atteint une maturité suffisante (coût et durée de vie).

### Enjeux et impacts

Le principal attrait de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique est que sa combustion ne produit directement aucune émission de CO<sub>2</sub> ; le bilan global peut néanmoins être très différent, selon la façon dont l'hydrogène a été produit. Il pourrait donc être amené à jouer un rôle significatif dans le domaine des énergies décarbonées si une infrastructure adéquate est déployée à grande échelle, s'apparentant à une véritable transition énergétique vers une « économie de l'hydrogène » et s'inscrivant nécessairement dans le long terme. Alternativement, les applications de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique pourraient rester cantonnées à des applications de niche. Selon le « modèle » qui se mettra en place, les implications du point de vue des investissements en infrastructures seront significativement différentes.

Selon l'étude prospective WETO-H2, publiée en 2007, si les tendances actuelles se maintiennent, l'hydrogène ne représenterait que 2 % de la consommation énergétique mondiale en 2050 (3 % en Europe). Concernant les infrastructures, le projet européen HyWays a analysé plusieurs scénarios prospectifs montrant qu'un déploiement à grande échelle de l'hydrogène pour l'automobile nécessiteraient des investissements cumulés pour

les infrastructures à hauteur de 60 Md€ pour un parc de 16 millions de véhicules à l'horizon 2027.

Par ailleurs, l'hydrogène pourrait soulever des questions du point de vue de l'acceptabilité, du fait de son usage comme combustible. Des travaux spécifiques aux normes de sécurité ont d'ailleurs été initiés dans la perspective du déploiement d'une infrastructure dédiée à l'hydrogène. Une autre difficulté réside dans le décalage entre les « promesses » de l'économie de l'hydrogène, qui a pu être « survendue », et l'implémentation effective de ces technologies. Ainsi les stratégies actuelles des États membres de l'Union européenne et des constructeurs en matière de véhicules décarbonés s'orientent davantage vers les véhicules hybrides et électriques.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : CEA, IFP, CNRS
- **Industrie** : Air Liquide, Areva, Ceth, Mahytec, Mc Phy, N-GHY, Ullit
- **Pôles de compétitivité** : Axelera, Capenergies, Derbi, Tenerrdis, S2E2

### Principaux acteurs étrangers

- Air Products, BP, Linde, Praxair

## Position de la France

La France bénéficie avec Air Liquide de la présence sur son territoire d'un des leaders mondiaux de l'hydrogène.

La filière hydrogène mobilise un nombre relativement restreint d'acteurs français, mais l'ensemble de la chaîne est couverte, jusqu'aux usages finaux. Le niveau de soutien aux travaux de R&D menés dans ce domaine, ainsi que la façon dont ce soutien se répartit en fonction des secteurs d'application, a récemment été remis en cause par un rapport de l'OPECST de 2009 qui a soulevé la question d'un éventuel déséquilibre entre le soutien accordé aux véhicules à piles à combustible et celui accordé aux véhicules électriques équipés uniquement de batteries et aux véhicules hybrides.

## Analyse AFOM

### Atouts :

- Continuité du financement public de la R&D (programmes PAN-H puis HPAC de l'ANR).
- Présence d'un des leaders mondiaux.
- Mise en réseau des acteurs.

### Faiblesses

- Nombre relativement limité d'entreprises impliquées.
- Logistique lourde à déployer (transports, stockage).

### Opportunités

- Soutien européen aux activités de R&D à travers la structure « Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking ».
- Disponibilité de plusieurs briques technologiques pour la production ou le stockage.

### Menaces

- Risque de distanciation dans une compétition internationale accélérée, (États-Unis, Japon).
- Concurrence d'autres filières vertes.

## Recommandations

Les recherches menées ces dernières années doivent être poursuivies par les organismes de recherche afin de préparer les technologies de rupture et en développant encore le partenariat public-privé. L'objectif visé d'une production massive d'hydrogène sans CO<sub>2</sub>, passe par le développement de projets de démonstration sur les procédés et la structuration d'une offre globale pour la filière.

## Liens avec d'autres technologies clés

44

62

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input checked="" type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 46. Captage, stockage et valorisation du CO<sub>2</sub>

### Description

La filière du captage et du stockage du CO<sub>2</sub> consiste à capter le dioxyde de carbone produit par des sites industriels puis à le comprimer, le transporter et le stocker dans une formation géologique de manière permanente et sûre pour l'environnement.

Trois voies de captage sont possibles :

- la postcombustion, qui consiste à capter le CO<sub>2</sub> dans les fumées de combustion ;
- l'oxycombustion, qui intervient plus en amont et remplace le comburant classique (air) par de l'oxygène, produisant des effluents à haute teneur en CO<sub>2</sub> ;
- la précombustion s'appuie sur un concept différent qui consiste à gazéifier le combustible, puis après modification, à séparer le CO<sub>2</sub> et l'H<sub>2</sub>.

Le CO<sub>2</sub>, après séparation, est comprimé puis transporté, par conduite ou par navire, jusqu'au lieu de stockage géologique où il est « injecté » (anciens gisements d'hydrocarbures, aquifères salins (sur terre et en mer), etc.).

Si parmi les trois principales voies de captage, aucune ne ressort aujourd'hui comme prioritaire, le choix d'une technologie par rapport à une autre dépend du type d'installation (taille, combustible, fonctionnement) et du type de mise en œuvre du captage du CO<sub>2</sub> (installation nouvelle ou existante).

La technologie postcombustion est la plus avancée ; des démonstrations sont en cours à l'international (plateforme Sleipner en Norvège, 1 million de tonnes de CO<sub>2</sub> injectées chaque année). La technologie de captage par oxycombustion fait également l'objet d'opérations de démonstration de recherche sur le territoire national (site de Lacq). Les premiers déploiements industriels pour équiper des centrales thermiques devraient intervenir à partir de 2020.

Les futurs axes de développement de la filière portent sur la maîtrise du captage du CO<sub>2</sub> afin de rendre les technologies moins énergivores et coûteuses. Le transport du CO<sub>2</sub> capté est une technologie relativement maîtrisée et son adaptation pour les centrales électriques (gaz, charbon) ne devrait pas nécessiter de modifications majeures. Enfin, pour que le stockage de CO<sub>2</sub> soit applicable à grande échelle, de nombreux défis technologiques, portant notamment sur la gestion du risque, doivent être relevés. Pour cela, il est nécessaire de :

- étudier l'injectivité du CO<sub>2</sub> ;
- contrôler les impuretés ;
- suivre le panache de CO<sub>2</sub> dans le réservoir ;
- réduire les incertitudes quant aux potentiels sites de stockage du CO<sub>2</sub> et de leur comportement sur le très long terme ;
- définir des normes de validations des sites ;
- concevoir les techniques de fermeture des sites.

### Applications

Le marché du captage et du stockage du CO<sub>2</sub> se structurera essentiellement dans les secteurs les plus fortement émetteurs de CO<sub>2</sub> incluant : les industries grosses consommatrices d'énergie (verre, papier, ciment, métallurgie, sidérurgie...), les centrales de production d'électricité et l'industrie pétrolière et gazière qui mobilise la réinjection du dioxyde de carbone dans les champs d'exploitation (50 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année).

Le stockage du CO<sub>2</sub> est une des principales technologies de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pour lequel de 2,5 à 3 Md\$ devraient être investis annuellement de 2010 à 2020 [source : AIE].

En France, les perspectives de marché portent sur les bassins industriels fortement émetteurs.

Dans les prochaines années, le marché sera principalement constitué d'unités de démonstration sur des centrales électriques avec une centaine de projets à grande échelle attendus d'ici 2020, représentant un investissement de 26 Md\$ [source : AIE/CLSF *Report to the Muskoka 2010 G8 Summit*].

Le marché est principalement à l'international où les producteurs d'électricité sont d'importants émetteurs de CO<sub>2</sub> (États-Unis, Chine, Inde, etc.).

### Enjeux et impacts

Le CO<sub>2</sub> contribuant à hauteur de 55 % à l'effet de serre anthropique, la technologie de captage et de stockage géologique du CO<sub>2</sub> vise à participer à la réduction par deux des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> d'ici à 2050.

Le paquet « énergie-climat » adopté fin 2008 par le Parlement européen comprend une directive qui établit un cadre juridique pour les activités de stockage géologique du CO<sub>2</sub>. La directive 2009/31/CE « relative au stockage géologique du dioxyde de carbone » a été votée le 23 avril 2009. Elle définit les conditions de sélection des sites de stockage, met en place un système de permis de stockage et prévoit les obligations relatives à l'exploitation, la fermeture et la post-fermeture d'un site de stockage.

Un important travail pédagogique et de dialogue avec les différents acteurs sociaux et la population qui réside à proximité des sites de stockage envisagés devra être effectué, avec des garanties de transparence et de contrôles indépendants.

Enfin, un enjeu majeur réside au niveau de l'équation économique de telles opérations. De tels projets seront fortement capitalistiques, et les modèles économiques permettant de les rentabiliser sont encore incertains.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : BRGM, IFP Énergies nouvelles, Ineris, IPG (Paris)
- **Industrie** : Air Liquide, Alstom, ArcelorMittal, CGGVeritas, EDF, GDF-Suez, Geogreen, Géostock, Technip, Total, Veolia
- **Pôle de compétitivité** : Avenia

### Principaux acteurs étrangers

- Foster Wheeler, General Electric, Halliburton, Mitsubishi Heavy Industries, Schlumberger, Siemens

## Position de la France

Les compétences françaises dans le domaine du captage et du stockage du CO<sub>2</sub> sont avérées, alors que, paradoxalement, les perspectives de mise en œuvre sur le territoire national sont passablement limitées. On peut retenir le principe selon lequel il s'agirait donc d'un « marché potentiel à l'export », avec des acteurs majeurs tels qu'Alstom ou Air Liquide, en remarquant toutefois que les principaux marchés géographiques visés à court terme (États-Unis, Chine) seront fortement concurrentiels et parfois protégés.

## Analyse AFOM

### Atouts

- La présence de grands groupes sur l'ensemble de la chaîne de valeur.
- Le soutien au développement de l'offre : appels à projet de l'ANR, appel à manifestation d'intérêt de l'Ademe.

### Faiblesses

- Un marché domestique de taille modeste.
- Pas de retour sur investissement en l'état, en raison du prix du carbone trop faible.

### Opportunités

- Un marché mondial en développement.

### Menaces

- Un développement de la filière fortement conditionné par la mise en place d'une politique adaptée, notamment au niveau de l'Europe.

## Recommandations

De façon générale, le développement d'une telle filière passera par la mise en place d'un cadre réglementaire propice à son développement au regard de l'importance des investissements et des coûts d'exploitation, un facteur clé étant le prix donné au carbone. Sur ces questions, le cadre de réflexion est, *a minima*, européen.

La France pourra probablement conforter sa position au travers de sa participation à de grands projets internationaux. Les projets de démonstration développés sur le territoire national auront surtout vocation à constituer une vitrine du savoir-faire français.

## Liens avec d'autres technologies clés

8

53

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



# 47. Énergie nucléaire

## Description

Pour la production d'électricité, l'énergie nucléaire peut être produite à partir de deux types de réactions : la fission (avec l'uranium comme combustible, principalement) et la fusion (à partir d'isotopes de l'hydrogène).

Les générations actuelles de réacteurs, dites générations II et III, reposent sur la fission à neutrons lents. Il s'agit de technologies relativement matures, les réacteurs de type EPR (dont le développement a commencé au début des années quatre-vingt-dix) en représentant une des versions les plus avancées. Alors que l'EPR est considéré comme une évolution de la génération précédente, la future génération IV (réacteurs à neutrons rapides) reposera sur un principe de fonctionnement différent, entraînant notamment l'utilisation de fluides caloporteurs autres que l'eau.

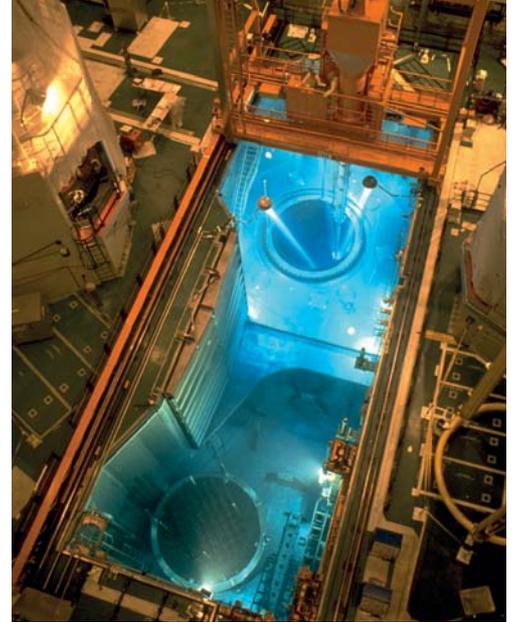
Quelle que soit la filière considérée, des besoins technologiques sont identifiés, dont les principaux sont :

- les outils de simulation numérique : ces outils sont indispensables au stade de la conception, mais ont aussi un rôle clé à jouer au niveau des études de sûreté ; ces outils doivent donc permettre de prédire le comportement de systèmes complexes en fonctionnement normal ou accidentel ;
- les matériaux : il s'agit en particulier de mettre au point de nouveaux matériaux (alliages métalliques, composites, revêtements céramiques...) adaptés aux futurs réacteurs à neutrons rapides et aux réacteurs à fusion. Ces matériaux seront soumis à des conditions extrêmes (irradiation, température) et leur vieillissement devra pouvoir être prédit avec suffisamment de précision ;
- l'instrumentation pour le contrôle, le pilotage et la sécurité des installations : l'objectif est d'élargir les possibilités de mesure et de traitement du signal. L'éventail est large : mesures chimiques, mécaniques, optiques, thermiques, neutroniques...

Certains besoins spécifiques concernent la fission, en particulier :

- l'amélioration du cycle du combustible, que ce soit au niveau de l'amont (extraction, conversion et enrichissement du combustible) ou de l'aval (traitement des combustibles irradiés) ;
- la maintenance et l'amélioration de la sûreté des réacteurs actuellement en service, en particulier dans la perspective de l'extension de leur durée de vie.

La fusion (ITER), quant à elle, s'inscrit dans un horizon à long terme (fin du XXI<sup>e</sup> siècle), d'autant que la génération IV, si elle est mise en service, repoussera à très long terme le problème des ressources énergétiques. La fusion nécessitera néanmoins des investissements en R&D significatifs, en particulier dans le domaine de la physique des plasmas et de l'intégration des systèmes.



## Applications

L'énergie nucléaire est bien adaptée à la production d'électricité en base, avec un impact limité du point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>.

En France, en 2008, le nucléaire représentait 76 % de la production d'électricité. Au niveau mondial, l'énergie nucléaire est présente dans 30 pays, et assure globalement 14 % de la production d'électricité. Le parc installé a connu une forte croissance dans les années soixante-dix et quatre-vingts, avant un net ralentissement à partir des années quatre-vingt-dix : la puissance installée représente actuellement 374 GW, contre environ 320 GW en 1990.

Fin 2010, on dénombrait 57 nouveaux réacteurs en cours de construction, dont 23 en Chine. Cela représentera une capacité additionnelle de 55 GW, soit l'équivalent de 14,6 % du parc actuel. Les programmes de construction les plus ambitieux se situent en Corée du Sud, en Chine, en Russie et en Inde ; des perspectives intéressantes existent aussi aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en Italie.

## Enjeux et impacts

En France le premier enjeu est l'indépendance énergétique et la contribution majeure à la réduction du déficit de la balance commerciale ainsi que la fourniture d'énergie à un prix modéré. Le recours à l'énergie nucléaire est perçu comme une option possible dans le cadre de la lutte contre le changement climatique et pour répondre aux besoins croissants en électricité au niveau mondial. En France, les besoins se situent essentiellement au niveau de l'entretien et de la prolongation du parc actuel, ainsi qu'au niveau des nouvelles générations susceptibles de prendre le relais à long terme. Au niveau international, les programmes d'investissement annoncés ouvrent des perspectives aux filières industrielles, mais soulèvent également des inquiétudes relatives à la sûreté et aux risques de prolifération.

Par ailleurs, l'opinion publique française reste globalement en faveur du recours au nucléaire pour assurer la majorité de la production d'électricité (source : baromètre d'opinion sur l'énergie et le climat, CGDD) ; l'écart entre opinions favorables et opinions défavorables tend néanmoins à se réduire. Un des points de cristallisation des débats autour du nucléaire est la gestion des déchets

### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

radioactifs ; à ce titre, des enseignements pourront être tirés des débats publics menés depuis plusieurs années autour du site expérimental de stockage souterrain de Bure-Saudron.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : Andra, CEA, IRSN...
- **Industrie** : Alstom, Areva, Bouygues, EDF, GDF-Suez, Vinci...
- **Pôles de compétitivité** : Pôle Nucléaire de Bourgogne ; Trimatec

### Principaux acteurs étrangers

- GE-Hitachi, Mitsubishi Heavy Industries, Rosatom, Toshiba-Westinghouse...

## Position de la France

Le programme électronucléaire des années quatre-vingts et quatre-vingt-dix a permis à la France de se positionner parmi les leaders mondiaux de l'énergie nucléaire. La filière française comporte plusieurs grands groupes et quelques centaines de PME, dont environ 200 spécialisées dans le domaine du nucléaire. La maintenance emploie à elle seule plus de 20 000 intervenants extérieurs.

Le soutien public à la recherche dans le domaine du nucléaire (fission et fusion) reste significatif : ces dépenses représentaient en 2008 environ la moitié du budget de R&D dédié à l'énergie. On peut également souligner qu'un volet du programme « investissements d'avenir » est dédié au « nucléaire de demain » ; il comporte trois priorités : le futur prototype de réacteur de quatrième génération ; le réacteur expérimental Jules Horowitz ; le traitement et le stockage des déchets.

La France reste donc un des acteurs majeurs de la recherche dans le domaine du nucléaire. Au niveau industriel, sa position a néanmoins pu être fragilisée par les retards pris sur les deux chantiers EPR en Europe (du fait de leur positionnement en tant que têtes de série), ainsi que par les difficultés rencontrées sur l'appel d'offres aux Émirats Arabes Unis. L'EPR reste néanmoins le réacteur de génération III dont la construction est la plus avancée (des chantiers en cours en Finlande, en France et en Chine) et il reste très bien positionné dans beaucoup de pays qui ont fait le choix de la relance du nucléaire (UK, USA, Italie, Inde et Pologne notamment). Par ailleurs, Areva travaille sur un projet de réacteur de moindre puissance, baptisé Atmea-1 (1 GW, contre 1,6 GW pour l'EPR), en partenariat avec le japonais Mitsubishi Heavy Industries.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Un cumul d'expérience sans égal en matière d'exploitation de réacteurs et de gestion du cycle du combustible.
- L'importance de la filière industrielle (grands groupes et sous-traitants).
- La capacité de R&D.

### Opportunités

- Les programmes d'investissement majeurs à l'international.

### Menaces

- L'émergence de nouveaux concurrents (coréens, chinois).

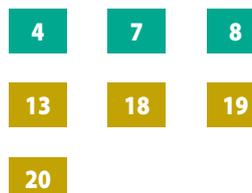
## Recommandations

Les actions de recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire font l'objet d'une coordination (en particulier entre les organismes de recherche et les principaux acteurs industriels) qui s'est structurée au niveau national autour du programme Astrid, et qui s'opère aussi au niveau européen dans le cadre de la plateforme « Sustainable Nuclear Energy Technology ». Il faut par ailleurs souligner que les travaux de recherche représentant des enjeux majeurs à long terme (génération IV, projet Iter) font l'objet de coopérations au niveau mondial.

Les technologies du nucléaire ne sont toutefois pas l'apanage de groupes industriels internationaux et de grands organismes de recherche. Des besoins spécifiques existent, sur lesquels des PME peuvent se positionner (instrumentation, métiers de la maintenance... mais aussi, à l'avenir, démantèlement des réacteurs en fin de vie) ; un accompagnement peut toutefois s'avérer nécessaire, puisqu'aborder ces marchés requiert de bien intégrer et maîtriser les « référentiels » (normes, certifications...) propres au secteur nucléaire.

Il faut enfin souligner que le marché français du nucléaire est majoritairement celui de la maintenance ; de ce fait, les principales opportunités actuelles se situent au niveau international. Pour les PME de la filière, l'export représente donc un enjeu majeur, y compris, le cas échéant, en réponse aux demandes de concurrents des grands acteurs français. D'autres aspects (structuration de filière, normes...) dépassent le seul champ de l'analyse technologique.

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 48. Solaire photovoltaïque

### Description

La technologie photovoltaïque (PV) permet la conversion de l'énergie solaire en courant électrique. Les cellules photovoltaïques, des dispositifs semi-conducteurs, sont associés en modules d'une capacité de plusieurs centaines de W. Les modules sont eux-mêmes assemblés pour former des systèmes PV, intégrant un convertisseur courant continu-courant alternatif ou courant continu-courant continu, un régulateur et éventuellement un équipement de stockage de l'électricité. Les systèmes sont hautement modulaires, de quelques W à plusieurs MW, et peuvent être connectés au réseau.

Les cellules dites de deuxième et troisième générations sont appelées à succéder aux cellules à base de silicium massif :

- Les cellules de deuxième génération résultent du dépôt de la couche de semi-conducteur directement sur un substrat à moindre coût (verre, acier, acier flexible, films plastiques). La production de ce type de cellules permet d'éviter l'étape de transformation du silicium en tranche (« wafer »). Les cellules de deuxième génération permettent d'équiper de très grandes surfaces en les associant à un support souple (membrane), pour le bâtiment notamment, avec une rapidité de mise en œuvre élevée. On distingue le silicium amorphe (a-Si, non cristallin), le tellure de cadmium (CdTe) et le cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS). Les cellules à hétérojonction, notamment CdS-CdTe et CIS-CdS, sont d'un intérêt majeur.
- Les cellules de troisième génération rassemblent plusieurs concepts : la superposition de multiples cellules utilisant des bandes d'absorption différentes (cellules multi-jonctions), les cellules polymères et d'autres types de cellules organiques (matériau actif constitué d'un mélange polymère/fullerène). La troisième génération de cellules PV vise à dépasser les limites maximales de rendement des cellules actuelles.

Les couches minces représentent actuellement la solution technologique potentiellement à bas coût et basse efficacité tandis que les cellules PV de troisième génération offrent des perspectives de rendement élevé mais à coûts également élevés.

Des efforts sont nécessaires pour augmenter les performances des cellules, des modules et systèmes, les procédés industriels et la standardisation. La réduction des coûts de fabrication reste une priorité pour la filière.

Des efforts sont nécessaires pour augmenter les performances des cellules, des modules et systèmes, les procédés industriels et la standardisation.

La réduction des coûts de fabrication reste une priorité pour la filière.

### Applications

Les technologies PV sont employées sur une large gamme d'applications : pour les résidences, les commerces, pour l'industrie et les applications hors réseau de différentes dimensions. Les applications hors réseau offrent l'opportunité de pouvoir électrifier des zones à accès difficile. Les cellules de première génération, aux coûts et à l'efficacité moyens, représentent actuellement 90 % du marché. La technologie a-Si capte 90 % du marché actuel des cellules de deuxième génération.

En 2009, le volume de production mondiale de 7 GW de modules PV a été atteint. Le parc installé représentait près de 16 GW, à 70 % en Europe (Allemagne et Espagne). [source : European PV Industry Association] La croissance du parc devrait se poursuivre, soutenue par les plans de développement du secteur avec des tarifs d'achat de l'électricité produite. L'AIE PV Roadmap 2009 prévoit en 2030 une capacité mondiale d'environ 750 GW installée, toutes technologies confondues.

L'ensemble du marché PV en France a généré un chiffre d'affaires de 1,6 Md€ et la production d'électricité photovoltaïque s'est élevée à 0,16 TWh, (0,03 % de la production totale brute d'électricité) en 2009.

Afin d'intégrer et de gérer de larges quantités d'électricité photovoltaïque dans les réseaux, de développement sont en cours. En parallèle, l'autoconsommation de l'électricité produite est appelée à se développer fortement.

### Enjeux et impacts

Le solaire photovoltaïque fait partie des filières susceptibles d'être mobilisées pour que la France puisse atteindre l'objectif fixé par la directive européenne 2009/28, c'est-à-dire une part de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation d'énergie finale brute, en 2020. La programmation pluriannuelle des investissements a notamment fixé un objectif de 5,4 GW de capacité de production d'électricité à partir de l'énergie solaire à l'horizon 2020.

Le recyclage des panneaux se développe, notamment ceux équipés de la technologie CdTe pour lesquels le cadmium, un métal toxique, doit être récupéré. Le photovoltaïque reste globalement bien perçu par les Français, d'autant plus que ce sont principalement des installations intégrées au bâtiment, et non des centrales avec de grandes emprises au sol. La multiplication récente des installations chez les particuliers a toutefois pu s'accompagner d'un certain nombre de contre-références, le développement de la filière semblant relever avant tout d'un effet d'aubaine.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



Liens avec d'autres technologies clés

51

52

75

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : Armines, CEA/Ines, InESS, ECPM, ICMCB, IES, IPCMS, Irdep, LPICM, LGEP, LPSC Meudon, LCS, Lamp, Simap
- **Industrie** : Appolon Solar, Solar Force, Nexcis, Solsia, EMIX, Photowatt, Tenesol, Arkema, EDF EN, Saint Gobain, Air Liquide, Total, GDF Suez
- **Pôles de compétitivité** : Alsace Energivie, Capenergies, Derbi, S2E2, Tenerrdis

### Principaux acteurs étrangers

- First Solar, Suntech Power, Sharp, Q-Cells, Yingli Green Energy, J A Solar, Kyocera, Trina Solar, SunPower, Gintech

## Position de la France

Au niveau mondial, l'industrie photovoltaïque française occupe une place modeste, les principaux producteurs étant américains et asiatiques, la production chinoise étant par ailleurs en forte progression. Pourtant la France possède des positions solides sur certains éléments hors panneaux, notamment le verre où les produits de Saint Gobain sont reconnus et utilisés mondialement.

Pour les première et deuxième génération, l'enjeu consiste à maintenir la filière française du solaire à niveau dans la compétition technologique mondiale, sur l'ensemble du cycle de production. Les opportunités pour les technologies françaises dépendent de la capacité de notre R&D à diminuer les coûts pour la première génération et à augmenter fortement les rendements pour la deuxième. Plusieurs projets de recherche structurants déjà lancés comme Solar Nano Crystal (CEA, Edfen et PV Alliance, Oséo-ISI, 170 M€ de budget), Solcis (Oséo ISI, 30 M€ de budget, CNRS, Nexcis), Cisel (financement Ademe, pilotage Irdep) et divers projets soutenus par le FUI visent à répondre à ces défis. Il s'agit de les mener à bien et d'en mesurer les jalons technologiques et d'en évaluer les impacts industriels en continu.

Les enjeux offensifs pour la France portent essentiellement sur la troisième génération, pour laquelle se développent notamment des projets pour le développement de cellules organiques (CNRS, CEA). Le projet Oséo/ISI Oscar (budget 20 M€ sur 2010-2014) mené par le groupe Armor, vise à développer des cellules photovoltaïques

organiques pour une production en 2015. Des ruptures sont également attendues dans le domaine de cellules à très haut rendement (multicouches et cellules photovoltaïques à concentration).

## Analyse AFOM

### Atouts

- Cinquième gisement solaire européen.
- Compétences technologiques dans les entreprises et centres de recherche.
- Compétences reconnues dans le photovoltaïque intégré au bâti.

### Faiblesses

- Absence de « champion national ».

### Opportunités

- Marché en forte croissance.
- Grands programmes internationaux, (Plan solaire Méditerranéen).

### Menaces

- Avance technologique des acteurs américains et allemands.
- Risque de rupture d'approvisionnement (tellure pour les cellules CdTe et indium pour les cellules CIGS).
- Réduction d'un niveau de subventions au départ élevé.

## Recommandations

Le principal enjeu pour la France, d'un point de vue technologique, consiste à pouvoir se positionner sur le photovoltaïque de troisième génération, domaine dans lequel le jeu est encore relativement ouvert. L'enjeu est d'autant plus significatif que les types de matériaux et les compétences mobilisés permettent d'autres types d'applications : éclairage, capteurs, électronique... avec des perspectives d'industrialisation à moyen terme.

Pour cela, il est nécessaire que la R&D française se positionne par rapport aux pôles en cours de constitution notamment au niveau européen (Dresde, Eindhoven) et développe ses coopérations avec les meilleurs d'entre eux. D'autres facteurs pourront par ailleurs contribuer au développement pérenne de la filière : renforcer la capacité des équipementiers à mettre en œuvre de nouveaux matériaux ; favoriser réglementairement l'intégration au bâti; assurer une visibilité suffisante sur les évolutions des tarifs d'achat de l'électricité d'origine photovoltaïque.

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 49. Énergie éolienne en mer

### Description

Les éoliennes en mer utilisent le même principe que celles situées à terre : la force motrice du vent est collectée à travers des pales pour être convertie en électricité qui est exportée à terre par des câbles sous-marins. Elles sont groupées « en fermes d'éoliennes » de plusieurs dizaines de MW raccordées au réseau.

On distingue deux types de technologies en fonction du système de fixation :

- Les éoliennes « posées » sur le fond marin, qui reposent sur un amarrage gravitaire, une pile simple, double, par structure entretoisée (« jacket ») ou encore sur un tripode, jusqu'à 40 m de profondeur ;
- Les éoliennes flottantes, qui s'ancrent au fond marin au moyen de plusieurs systèmes : flotteur colonne à grand tirant d'eau (« spar »), flotteur semi-submergé et support à lignes tendues pour des installations loin des côtes à des profondeurs plus élevées (30 à 300 m).

Si les transferts technologiques entre l'éolien terrestre et l'éolien peu profond sont importants – les éoliennes en mer étant essentiellement dérivées des éoliennes terrestres de grande puissance, plusieurs MW, avec une protection améliorée à la corrosion – il existe une rupture technologique pour aller vers l'éolien offshore flottant. Les machines flottantes élargissent les zones potentielles de développement de parcs dans de nombreux pays comme en France.

Une industrie complète spécialisée pour l'« offshore » est en cours de constitution, notamment en Europe.

Les turbines éoliennes en mer peuvent bénéficier de vents plus forts et moins turbulents que sur terre et limiter l'impact visuel. Les sévères conditions marines appellent le développement de systèmes très fiables et plusieurs nouveaux concepts de turbines en mer sont en cours de tests. Les principaux verrous visent à :

- développer une nouvelle génération de turbines et de structures marines spécialement conçues pour un environnement marin avec des besoins d'opération et de maintenance réduits ;
- abaisser le coût des installations avec moins de 40 m de fond et améliorer la stratégie d'installation et de la chaîne d'approvisionnement ;
- améliorer la capture d'énergie par le rotor, particulièrement à basses vitesses, dans des conditions turbulentes ;
- augmenter les temps d'opérations des fermes en mer ;
- réduire les coûts d'opération et de maintenance ;
- allonger la durée de vie des turbines et réduire le coût de composants ;

- améliorer les technologies de transmission ;
- évaluer les interférences avec le contrôle de la navigation maritime et aérienne.

### Applications

La technologie éolienne en mer vise à produire de l'électricité d'origine renouvelable. Le parc d'éoliennes en mer était d'environ 800 turbines raccordées au réseau, totalisant une puissance de 2 GW, essentiellement en Europe, notamment en Allemagne et au Royaume-Uni, en augmentation de 54 % [source : European Wind Energy Association EWEA]. En 2010, près de 1 GW de capacité devrait être installé pour un chiffre d'affaires de 3 Md€. Les plus grands prototypes industriels atteignent 10 MW et des diamètres de 145 m.

Même soutenue par une forte croissance, la part des éoliennes en mer restera inférieure à celle des éoliennes terrestres. En 2050, les deux tiers environ de l'électricité d'origine éolienne devraient toujours provenir d'éoliennes terrestres.

À cette date, les principaux marchés seront dans l'ordre, la Chine, l'Europe et les États-Unis.

Les coûts d'investissements devraient évoluer vers une réduction estimée à 38 % en 2050 : ils passeraient de 3 000 - 3 700 \$/kW en 2010 à 2 100 - 2 600 \$/kW.

### Enjeux et impacts

L'éolien offshore fait partie des filières susceptibles d'être mobilisées pour que la France puisse atteindre l'objectif fixé par la directive européenne 2009/28, c'est-à-dire une part de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation d'énergie finale brute, en 2020, contre 10,3 % en 2005.

Un premier appel d'offre pour 500 MW d'éolien offshore a été lancé en France. Le plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale proposé dans le cadre du Grenelle de l'environnement prévoit que 1 GW de capacité d'éolien en mer serait à installer d'ici à 2012 et 6 GW d'ici à 2020, sur 25 GW d'énergie éolienne. Un appel d'offre de 3 GW est en préparation pour implanter au large des côtes françaises, environ 600 éoliennes, à partir de 2015.

À l'instar de ce qui s'est produit avec l'éolien terrestre, les projets d'éoliennes en mer peuvent rencontrer de fortes oppositions locales (marins pêcheurs, riverains, professionnels du tourisme...), se traduisant parfois par des recours en justice.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Énergies nouvelles, Ifremer
- **Industrie** : Alstom, Areva, DCNS, EDF EN, GDF-Suez, Leroy Somer, Nass & Wind, Nexans, Poweo, Rolix, Saipem, Technip, Vinci
- **Pôles de compétitivité** : Pôle Mer Bretagne, Pôle Mer PACA

### Principaux acteurs étrangers

- Acciona, Gamesa, GE Wind, Nordex, Siemens, RE Power, Statkraft, Suzlon, Vestas

## Position de la France

La filière française de l'industrie éolienne ne s'est pas développée de façon significative, et le développement de l'éolien en mer ne pourra donc pas ou peu s'appuyer sur celle-ci.

Ce point n'est pas forcément critique dans le cas des éoliennes flottantes qui représentent une opportunité importante pour la filière française. Les technologies sont notablement différentes de celles mises en œuvre dans le domaine de l'éolien terrestre et s'apparentent à l'offshore pétrolier. Par ailleurs, la France possède les compétences en conception et développement pour développer la filière et grâce à sa façade maritime, elle dispose d'un des premiers potentiels européens.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Gisement éolien offshore significatif.
- Présence de grands groupes dans les activités prépondérantes de la filière : construction des fondations, raccordements au réseau électrique, installation, exploitation et maintenance.

### Faiblesses

- Faiblesse de la filière de l'éolien en général.

### Opportunités

- Lancement des premiers projets à l'échelle industrielle.
- Appels d'offres nationaux et internationaux.

### Menaces

- Intensité concurrentielle forte, en particulier au niveau européen (projet Seatec en mer du Nord et en mer Baltique).
- Conflits d'usage sur les zones maritimes.



## Liens avec d'autres technologies clés

7

11

43

## Recommandations

Il apparaît tout d'abord essentiel de renforcer l'offre française sur l'ensemble de la chaîne de valeur, notamment sur les composants.

Les principaux besoins de développements technologiques concernent l'éolien offshore flottant, lequel ne peut bénéficier que de transferts très limités de technologies issues de la filière de l'éolien terrestre. En revanche, l'expérience acquise dans le cadre du développement de cette dernière a montré la nécessité d'outils de concertation avec les parties prenantes de chaque projet afin de prendre en compte les différents aspects relatifs aux dimensions sociales.

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input checked="" type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 50. Géothermie

### Description

Les technologies d'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol visent deux utilisations principales : la production de chaleur et la production d'électricité. On distingue plusieurs filières :

- géothermie très basse énergie avec une température inférieure à 30°C (nappes d'une profondeur inférieure à 300 m et eau de mer). La chaleur extraite est utilisée pour assurer le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement des locaux au moyen d'une pompe à chaleur géothermique, cette dernière transférant les calories ;
- géothermie basse énergie ou basse enthalpie : température entre 30 et 90° C (ressources à une profondeur d'environ 1 000 m) pour l'alimentation des réseaux de chaleur urbains par échangeur de chaleur, le chauffage des serres, le séchage de produits, le thermalisme ;
- géothermie moyenne enthalpie : température comprise entre 90 et 150° C (gisements d'eau chaude ou de vapeur humide dans des bassins sédimentaires de 2 000 à 4 000 m de profondeur) pour laquelle la chaleur est valorisée notamment dans des procédés industriels et éventuellement pour produire de l'électricité par cycle binaire où un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide de type isobutane, isopentane, ammoniac, qui présente la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau ;
- géothermie haute température ou haute enthalpie : température supérieure à 150° C (réservoirs localisés entre 1 500 et 3 000 m de profondeur, généralement dans les zones de volcanisme ou de tectonique active) pour la production d'électricité à l'aide de turbines.

L'eau peut être évacuée en surface si elle est initialement peu chargée en sel dissous ou bien réinjectée, doublet géothermique. Ces technologies sont assez mûres pour pouvoir être déployées en fonction des caractéristiques des sites et de la nature de la demande en énergie (puissance appelée, température nécessaire). De nouveaux développements sont attendus en ce qui concerne :

- pompes à chaleur géothermiques : amélioration de la connaissance des formations superficielles, développement de la connaissance des performances et de l'impact sur les milieux des différents types d'échangeurs souterrains, optimisation des techniques de forage et réduction de leur coût et impact, conception des systèmes ;
- réseaux de chaleur : la recherche et la démonstration sur le thème du stockage d'énergie intersaisonnier en aquifère profond et l'intégration des réseaux de chaleur basse température dans le bâtiment ;
- tenue à la corrosion ;

- étude des impacts sur l'environnement marin des rejets d'eau de mer à température différente du milieu ;
- amélioration de l'évaluation des ressources, de l'exploration et des méthodes d'exploitation notamment dans les DOM.

Une nouvelle filière en cours de développement repose sur la géothermie profonde assistée (EGS). La chaleur est extraite des roches chaudes fissurées entre 3 000 et 5 000 m de profondeur en stimulant les roches peu perméables par injection d'eau sous forte pression dans le sol. Plusieurs sites pilotes sont installés (France, Allemagne, Suisse, Australie).

### Applications

La puissance mondiale installée pour la production de chaleur est estimée à 27 000 MW, correspondant à une production annuelle supérieure à 70 000 MWh [source : BRGM] en augmentation. La capacité de production d'électricité s'élève à 10 000 MW en 2007 [source : BRGM], soit 0,3 % de la puissance mondiale électrique installée. Les principaux pays producteurs se situent sur la périphérie du Pacifique sur le continent américain, en Asie et en Océanie.

En France, 16,6 MW de puissance sont installés, (15 MW à Bouillante en Guadeloupe). Dans les DOM insulaires, le contexte volcanique et une volonté politique d'aller vers l'autonomie énergétique ouvrent la perspective de dépasser les 120 MW à l'horizon 2015. En France métropolitaine, de larges bassins sédimentaires avec des couches géologiques renfermant des aquifères sont exploitables (Bassin parisien et Bassin aquitain, Alsace).

La technologie EGS offre des perspectives sur le plus long terme et à une échelle géographique plus étendue, en permettant de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur, et ce sur une grande partie du globe. Les premières applications commerciales sont attendues d'ici à 2020.

### Enjeux et impacts

Les emplois liés à la fabrication et à la commercialisation des équipements pour les pompes à chaleur, leur installation et leur maintenance sont estimés à 5 000 en 2007 et à 20 000 en 2012. [source : CGDD, *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*].

En nombre de MWh produits, la géothermie constitue, avec la biomasse et l'éolien, l'une des principales sources d'électricité renouvelable dans le monde après l'hydroélectricité.

En matière de production d'électricité, la géothermie profonde est identifiée comme un élément clé de l'autonomie énergétique des territoires. Les DOM et COM, du

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

fait d'un positionnement géographique et géologique exceptionnels, représentent un potentiel valorisable pour développer une position de leader.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : BRGM, CSTB, IPG Paris
- **Industrie** : AJ Tech, CFG Services, DFM-Sofath (De Dietrich), EDF, France Géothermie, Giordano Industries, Veolia/Dalkia
- **Pôles de compétitivité** : Avenia, Capenergies, Pôle Dream Eau & Milieux

### Principaux acteurs étrangers

- Chevron, ENEL, Halliburton, Nevada Geo Power, Ormat, Star Energy

## Position de la France

La France occupe une bonne position dans le domaine de la géothermie, ceci étant à relativiser en fonction des technologies :

- géothermie haute enthalpie : la France est relativement en retard, les pays en tête sont l'Islande, l'Italie, la Nouvelle-Zélande, les États-Unis et l'Indonésie ;
- géothermie basse enthalpie : la France a une expérience historique (Bassin parisien notamment) à mieux exploiter sur le marché domestique et international ;
- géothermie très basse température : la France est en retrait par rapport à des pays très volontaires comme la Suède ou la Suisse. Il n'existe pas d'offre d'opérateur structurée mais une offre portée par les fabricants de pompes à chaleur. La France a développé une expertise reconnue sur la technique du doublet pour l'exploitation de nappes chargées en sels minéraux et nécessitant un forage de réinjection.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Cumul d'expérience en géothermie basse enthalpie.
- Technologie proche de l'équilibre du marché pour la production de chaud et froid pour le secteur tertiaire.

### Faiblesses

- Technologies qui restent globalement complexes à mettre en œuvre (hors pompes à chaleur géothermique).
- Absence d'acteurs français d'envergure internationale.

### Opportunités

- Potentiel de développement de la géothermie profonde.

### Menaces

- Risque de domination des constructeurs étrangers de pompe à chaleur.

## Recommandations

Si la France possède un cumul d'expérience significatif dans le domaine de la géothermie, elle n'a pas su valoriser de façon notable ses compétences à l'international. Certaines d'entre elles, comme le développement de réseaux de chaleur couplés à la géothermie, ou la production d'électricité dans les zones insulaires volcaniques, pourraient toutefois permettre à la France de se positionner parmi les leaders mondiaux.

À ce titre, les installations exemplaires existantes (telles que la centrale de Bouillante) pourraient permettre la création de centres d'ingénierie d'excellence à vocation internationale. Les approches pluridisciplinaires (corrosion, géosciences...) doivent par ailleurs être privilégiées.

## Liens avec d'autres technologies clés

7

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



# 51. Stockage stationnaire d'électricité

## Description

Les principales technologies de stockage stationnaire de l'énergie électrique se répartissent en fonction de la capacité des systèmes :

- le stockage électrique à très grande échelle, aussi appelé stockage d'électricité de masse (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de MWh de capacités de production) comprend les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) et celles qui fonctionnent par compression d'air (ou « CAES » lorsque la chaleur de compression n'est pas récupérée ou « AA-CAES » lorsqu'il y a récupération) ;
- le stockage à grande échelle (plusieurs MWh à plusieurs dizaines de MWh de capacités), comprend les accumulateurs électrochimiques au plomb et au nickel-cadmium, l'électrochimie à circulation, et le stockage de chaleur haute température (thermique) avec réfractaire et turbine ;
- le stockage à moyenne échelle (quelques kWh au MWh)/à petite échelle (plusieurs Wh à plusieurs kWh), qui se différencient par les services offerts, et leur caractère embarqué-stationnaire. Elles incluent les supercondensateurs, les accumulateurs électrochimiques (plomb-acide, lithium, métal-air, sodium-soufre, etc.), les volants d'inertie, l'air comprimé en bouteilles, l'hydrogène associé à une pile à combustible, et les supraconducteurs.

L'énergie est stockée sous forme indirecte : une conversion intermédiaire est nécessaire avant utilisation à l'exception des supercondensateurs (stockage direct sous forme électrostatique) et des supraconducteurs (stockage sous forme magnétique).

Les capacités de décharge sont comprises entre la fraction de seconde pour les applications de haute puissance (alimentation ininterrompue) et quelques minutes pour la stabilité du réseau. Elles peuvent atteindre plusieurs heures pour les applications de grande capacité (équilibre offre demande, etc.).

Les STEP et CAES sont déployés industriellement, tandis que la plupart des autres technologies de stockage de masse sont encore au stade du prototype (électrochimie à circulation) ou d'études (AA-CAES, ...).

Les priorités de recherche et développement portent sur :

- la mise en place d'une approche système : développement de modèles physiques, mise au point de logiciels de simulation, étude de fortes pénétrations du stockage diffus ;
- l'amélioration des performances et la baisse des coûts des accumulateurs électrochimiques (procédés de fabrication, maintenance, éco-conception et recyclage) ;
- la diversification des technologies : AA-CAES en com-

plément des STEP, volants d'inertie pour les applications décentralisées.

## Applications

Les technologies de stockage sont destinées aux applications stationnaires qui visent à sécuriser les approvisionnements en électricité, optimiser la gestion du réseau électrique (plans de fréquence et de tension), lisser la courbe de charge, augmenter la pénétration des sources intermittentes renouvelables (éolien et solaire thermique et photovoltaïque) et réduire les besoins en centrales thermiques d'appoint.

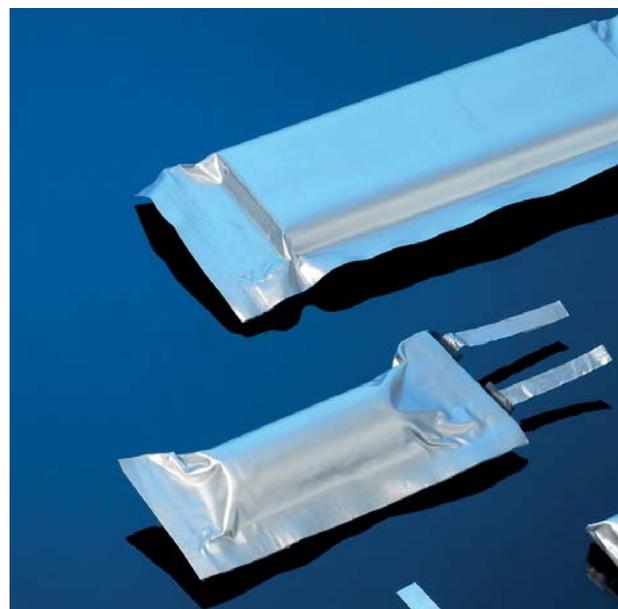
La capacité mondiale en 2009 de stockage d'énergie électrique est d'environ 100 GW [source : AIE], du fait principalement de la mise en œuvre de la technologie des STEP (350 sites). Cette capacité devrait s'élever à 189 GW en 2050 (source : AIE) couplée au développement des réseaux électriques intelligents.

Le marché du stockage de moyenne et petite échelle est dominé par les accumulateurs électrochimiques, essentiellement pour des raisons de coûts et de disponibilité des technologies.

## Enjeux et impacts

Le développement des technologies de stockage est une réponse à la nécessité d'améliorer la disponibilité et la qualité de l'alimentation en électricité. Il permettrait également de faire face aux impératifs du développement durable du Grenelle.

Il s'agit alors de s'assurer du bon fonctionnement des réseaux compte tenu de ces évolutions, en prenant en compte le fait que les solutions de stockage d'électri-



### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

citée actuellement mises en œuvre ne trouvent pas leur équilibre économique dans la seule rémunération des services systèmes et dans leur valorisation sur le marché dérégulé : l'amélioration de leur modèle économique passe aussi par la réduction des coûts pour l'industrie du stockage.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

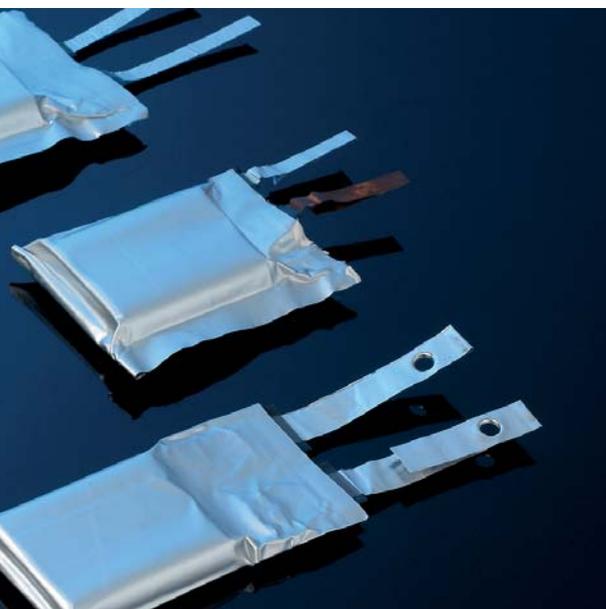
- **Recherche** : BRGM, CEA/Ines, Cirimat, CNRS/IMN, CNRS/LRCS Amiens, ICMCB, IFP Énergies nouvelles, Laboratoire Laplace (Toulouse)
  - **Industrie** : Areva, Batscap, EDF, EnerSYS, GDF-Suez, Mc Phy, Recupyl, SAFT, SAIPEM, Saint Gobain, Total
- Pôles de compétitivité : Avenia, Capenergies

### Principaux acteurs étrangers

- Alabama Electric Corp, C&D, East Penn, EnBW, E.ON, Exide, Firefly, Furukawa, General Electric, Maxwell, Panasonic, RWE Power, Samsung SDI, Siemens, Züblin

## Position de la France

La France détient une position très concurrentielle dans le domaine du stockage d'énergies. Le tissu industriel national est dominé par les STEP exploités de longue date par EDF production, et Alstom détient 25 % du marché mondial des turbo-machines. SAFT ou Batscap sur les technologies électrochimiques réalisent leur production et une partie de leur recherche en France. Certaines



PME sont par ailleurs très actives sur des produits innovants (volants d'inertie, recyclage des matériaux d'électrodes, etc.).

La France dispose de laboratoires publics de premier plan au niveau mondial dans le domaine du stockage électrochimique. Elle possède également un savoir-faire technologique reconnu dans l'électronique de puissance, les systèmes de charge, etc.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Dimension sociale.
- Multiplicité des techniques disponibles et des services pouvant être proposés aux réseaux électriques.

### Faiblesses

- Coûts d'investissements élevés (moins pour les stockages de masse).
- Grande sensibilité du modèle économique aux variations des écarts de prix heures creuses-heures pleines pour les stockages de masse et aux tarifs d'accès.

### Opportunités

- Développement des réseaux électriques intelligents et de la part des énergies renouvelables intermittentes dans le mix énergétique.
- Nécessité pour les opérateurs de réseaux publics d'électricité d'optimiser les investissements et d'accroître la sécurité de leurs réseaux.

### Menaces

- Réglementation contraignantes (lois sur l'eau par exemple pour les STEP).
- Tarifs d'accès aux réseaux électriques pénalisants pour les installations de stockage d'électricité de masse.

## Recommandations

Face à la concurrence internationale, il est essentiel de maintenir un niveau de recherche de haut niveau et soutenir les transferts vers l'industrie, d'accroître la demande et de stimuler le stockage décentralisé d'énergie ainsi que de :

- aménager des tarifs d'utilisation des réseaux électriques ;
- alléger les contraintes réglementaires pour la mise en œuvre de stockage de masse (STEP et AA-CAES) ;
- créer des mécanismes de soutien adaptés à chaque filière ;
- élaborer une directive stockage d'énergies avec les partenaires européens ;
- réaliser des opérations de démonstration pour les stockages de nouvelles générations (AA-CAES, batteries, volants...).

## Liens avec d'autres technologies clés

7

42

44

52

63

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 52. Réseaux électriques intelligents

### Description

Un réseau électrique intelligent est défini par la Commission européenne comme un système électrique capable d'intégrer de manière intelligente les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs afin de maintenir une fourniture d'électricité efficace, durable, économique et sécurisée. Les technologies associées s'articulent autour de :

- un réseau de transport et de distribution d'électricité intelligent équipé notamment de systèmes de transmission et de distribution (sous-stations, réseaux de capteurs) - permettant de communiquer entre les parties prenantes du système (producteurs-distributeurs-consommateurs) - ainsi que l'ensemble des systèmes de contrôle afin d'optimiser la gestion de la distribution, d'ajuster la production et de prévenir les dysfonctionnements du réseau ;
- des compteurs électriques intelligents installés chez les consommateurs et capables d'échanger avec le réseau en temps réel afin de mieux maîtriser la demande, de lisser les pics de consommation et d'effectuer un relevage à distance ;
- des systèmes de production et de stockage de l'énergie en partie décentralisés et permettant des flux bidirectionnels de l'électricité au travers de notamment la mise en place d'un réseau de stations de rechargement de véhicules électriques permettant également d'utiliser les batteries des véhicules comme source d'énergie d'appoint en cas de besoin.

Si une partie des technologies sont déjà proposées par les équipementiers du secteur (nouveaux compteurs, systèmes de contrôle dans les postes de distribution et de transport...), les stratégies de déploiement des systèmes ainsi que les modèles économiques sont en cours de définition. Les compteurs intelligents et les réseaux intelligents font notamment l'objet d'expérimentations visant leur déploiement prochain. Les paramètres clés qui joueront un rôle déterminant sur la forme et la nature des réseaux sont le niveau d'intelligence du système, le degré et la forme de décentralisation et les choix de régulation. Les principaux verrous technologiques portent sur :

- les technologies de réseau sous l'angle des matériels et des systèmes électrotechniques, dont l'électronique de puissance de type FACTS (« Flexible AC Transmission Systems »), qui doivent être adaptées pour s'adapter aux évolutions de l'architecture des réseaux et l'insertion des sources de production décentralisées. Ces systèmes sont une brique de base dans les réseaux électriques intelligents ;

- les systèmes d'information appliqués au réseau suite à la croissance de l'intelligence des réseaux et le développement des produits et services liés à cette intelligence ;
- les technologies de stockage centralisé et décentralisé ;
- la sécurité des réseaux et systèmes électriques intelligents.

### Applications

Cette technologie s'applique au transport et à la distribution d'électricité.

De nombreux programmes sont planifiés, notamment aux États-Unis pour la rénovation du réseau électrique, en Europe dans le cadre du paquet énergie-climat, en Chine, en Russie et en Inde. Le marché potentiel s'élèverait à 65 milliards de dollars en 2013 aux États-Unis, pour environ 42 milliards en 2008 [source : Lux Research].

Les compteurs intelligents sont un segment en fort développement du marché. En France, le remplacement des 35 millions de compteurs électriques à l'horizon 2017 par des compteurs intelligents représente un investissement de 4 Md€. Le marché mondial annuel serait de 4,7 Md\$ en 2013.

### Enjeux et impacts

Le développement des réseaux électriques intelligents est considéré comme prioritaire par de nombreux pays pour intégrer l'électricité d'origine renouvelable, maîtriser les consommations énergétiques et éviter les pannes.

D'une façon générale, les principaux enjeux sont :

- réaliser des économies d'énergie en fournissant au client final des informations et des outils de maîtrise de ses consommations ;
- lutter contre le réchauffement climatique en offrant une alternative à la construction de moyens de production de pointe généralement émetteurs de CO<sub>2</sub> et en favorisant l'insertion des énergies renouvelables ;
- éviter la consommation d'énergies fossiles en facilitant l'insertion des véhicules électriques (« vehicle to grid »), des pompes à chaleur, etc. pour adapter leur fonctionnement aux périodes les plus favorables pour la production d'énergie ;
- réduire les besoins d'investissement sur les réseaux en raison de l'accroissement de la demande électrique.

La directive européenne 2009/28 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables a fixé comme objectif pour la France une part de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation d'énergie finale

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

brute, en 2020, contre 10,3 % en 2005. L'article 16 portant sur l'accès au réseau et la gestion des réseaux précise les objectifs en termes de maintien d'un niveau élevé de qualité de fourniture d'électricité et de sécurité du système électrique, dans le cadre d'un accès garanti au réseau pour l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : G2Elab (Grenoble), LEG de Grenoble, L2EP (Lille), Supelec
- **Industrie** : Alcatel-Lucent, Alstom, Atos, Delta Dore, EDF, ERDF, GDF Suez, Itron, Legrand, Nexans, Schneider-Electric, Orange, RTE, Voltalia, Watteco, Wirecom Technologies, Renault
- **Pôles de compétitivité** : S2E2, Tenerrdis

### Principaux acteurs étrangers

- ABB, Actaris, BPL Global, Cisco, GE, Google, Toshiba, Hitachi, IBM, Landis et Gyr, Microsoft, Siemens

## Position de la France

La France dispose de compétences importantes en R&D en matière de réseaux électriques avec un accompagnement fort par les pouvoirs publics par rapport à ses partenaires européens. Cependant, le déploiement des technologies de compteur intelligent est plus avancé en Italie, ou en Europe du Nord par exemple. Ce décalage est encore plus accentué avec les États-Unis sur ce sujet.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Expertise française reconnue dans l'élaboration de réseaux électriques et de systèmes de télécommunications.
- Présence d'acteurs sur toute la chaîne de valeur.
- Rôle moteur de plusieurs industriels majeurs.

### Faiblesses

- Priorités assez mal définies.
- Faiblesse sur le segment des logiciels et des services informatiques.

### Opportunités

- Soutien affirmé au niveau européen.
- Opportunités à l'international à la fois sur les marchés établis et sur les marchés émergents.

### Menaces

- Difficultés à mobiliser les investissements à un niveau suffisant.

## Recommandations

Le développement des technologies permettant le stockage électrique sur le réseau nécessitera un volontarisme fort.

Concernant le déploiement des compteurs intelligents, un effort pédagogique et un système d'incitation financière sont nécessaires pour en améliorer l'acceptation par le grand public. La transparence et la sécurité des données doivent être assurées.

Des démonstrateurs de recherche intégrant également la dimension socio-économique sont à mettre en place ; ils seront dimensionnés pour constituer de réelles preuves de faisabilité.

## Liens avec d'autres technologies clés

51

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input checked="" type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 53. Technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures

### Description

Les technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures recouvrent le cycle de vie d'un champ pétrolier ou gazier dont les principales étapes sont : l'exploration du site, l'évaluation des voies d'extraction des ressources, le plan de développement du champ, la production proprement dite lorsque les premières quantités commerciales d'hydrocarbures sont extraites et enfin le décommissionnement du champ au bout de généralement 20 à 40 ans afin de restaurer le site. Les techniques mises en œuvre portent sur les examens d'exploration selon les méthodes magnétique, gravimétrique et sismique ainsi que sur les techniques liées aux forages d'exploration du réservoir, d'estimation des ressources, de production des hydrocarbures qui nécessitent de l'instrumentation, des systèmes de modélisation, des systèmes de pompage, d'injection de gaz et d'eau, de traitement des déchets et de l'eau.

Les efforts actuels portent sur la prolongation de l'exploitation des gisements d'hydrocarbures conventionnels, la réduction de l'impact environnemental de l'exploration-production et le développement de l'accès aux hydrocarbures non conventionnels. Plusieurs verrous liés à ces axes restent à lever, notamment afin de :

- augmenter le taux de succès dans l'activité d'exploration (25 % actuellement) par l'imagerie sismique du sous-sol, la simulation de la formation et de la circulation du pétrole ;
- accroître le taux de récupération (35 % actuellement) et la réduction des coûts opératoires des champs matures par le développement de l'instrumentation, des logiciels et des procédés (injection de gaz, d'additifs, de vapeur) ;
- explorer et développer de nouveaux champs pétroliers et gaziers dans des environnements complexes et fragiles – en zone arctique, en mer (offshore profond et ultra profond – au-delà de 3 000 m), dans les réservoirs à haute pression et haute température (au-delà de 1 000 bar et 150° C), réservoirs très enfouis (au-delà de 6 000 m) – qui nécessiteront la mise au point de nouveaux concepts de production (forage profond et ultra profond, modélisation numérique, imagerie ultraprofonde...), l'amélioration des techniques d'imagerie sismique pour observer sous les couches de sel et les zones plissées, et des matériaux aux propriétés mécaniques et thermiques adaptées ;
- améliorer les méthodes de récupération des hydrocarbures non conventionnels (sables bitumineux, huiles lourdes et extra lourdes, schistes bitumineux, gaz issus de gisement de charbon, gaz de schiste, etc.) par injection continue de vapeur d'eau, de solvant et la combustion *in situ* ainsi qu'un monitoring fin du réservoir asso-



cié à une modélisation en temps réel ;

- réduire les émissions de gaz à effet de serre et la réduction de l'impact environnemental de l'exploration-production par le captage et stockage du CO<sub>2</sub>, par la gestion et le retraitement des gaz résiduels, de l'eau, du SO<sub>2</sub> ;
- améliorer les procédés de production de carburants liquides à partir du gaz.

### Applications

Ces technologies sont dédiées à la production de carburants pour le secteur des transports (terrestres et aériens), de combustibles pour la production d'électricité et de chaleur ainsi que de matières premières pour l'industrie pétrochimique.

Ce sont des technologies avancées qui mobilisent des compétences multiples : géologie, géophysique, ingénierie pétrolière, sciences et technologies de l'information et de la communication, mathématiques appliquées, mécanique des fluides, sciences du vivant, nanotechnologies...

La production d'hydrocarbures devrait croître de 60 % au cours des vingt prochaines années pour atteindre près de 9 Gtep en 2020 [source : AIE]. La nécessité d'accroître les capacités de production, la hausse des prix du brut et l'accès de plus en plus difficile aux réserves entraînent une forte demande de la part des compagnies pétrolières en équipements et services pour l'exploration-production.

Les investissements pétroliers en exploration et production dans le monde sont évalués à 400 Md\$ en 2009

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



[source : IFP Énergies nouvelles] et devraient être stables ou croître légèrement de 5 % au maximum en 2010. Les principales zones d'investissements en exploration-production sont en Amérique du Nord, en Asie et en Afrique.

Le marché est structuré entre trois types d'acteurs : les compagnies pétrolières dominées par les cinq majors (ExxonMobil, BP, Shell, Chevron et Total) produisant et commercialisant les hydrocarbures extraits, les sociétés parapétrolières offrant leurs services pour les activités d'exploration, de forage et de construction en mer (plateforme, installations sous-marines) et les États pétroliers détenant les réserves. Environ 85 % des réserves sont sous contrôle des compagnies nationales.

## Enjeux et impacts

Le contexte pétrolier et parapétrolier se caractérise par des tendances lourdes : accès aux réserves de plus en plus difficiles, abondance de projets de développement de plus en plus complexes et montée durable des prix des hydrocarbures.

Le gaz et le pétrole représentent 60 % de l'énergie primaire. L'exploitation des ressources non conventionnelles est devenue un enjeu majeur, mais leur impact environnemental risque d'être très important.

La dépendance de l'Union européenne de l'importation de gaz naturel va s'accroître : en 2020, elle sera dépendante pour les deux tiers de sa consommation et dès 2030 ce niveau atteindra plus de 80 % [source : IFP Énergies nouvelles].

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Énergies nouvelles
- **Industrie** : CGGVeritas, Doris Engineering, GDF Suez, Saipem, Technip, Total, Vallourec

### Principaux acteurs étrangers

- Baker Hugues, BP, Chevron, ExxonMobil, Halliburton, Helmerich, Nabors, PGS, RDSHELL, Schlumberger, WesternGeco

## Position de la France

L'industrie parapétrolière française occupe aujourd'hui le quatrième rang mondial dans son secteur d'activité et compte en son sein des acteurs de taille internationale, tels que CGGVeritas, Doris Engineering ou Technip.

Par ailleurs, l'industrie parapétrolière française s'appuie sur l'existence de compagnies pétrolières et gazières de rang mondial dont les centres de décision sont en France. Ainsi, Total est la quatrième compagnie pétrolière mondiale et GDF Suez figure parmi les cinq premières compagnies gazières mondiales.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Positionnement parmi les leaders.

### Faiblesses

- Absence d'investissements sur la zone Europe.

### Opportunités

- Baisse des coûts en cours et reprise de la demande mondiale.
- Existence d'opportunités importantes nécessitant des technologies toujours plus complexes.

### Menaces

- Secteur cycliquement touché par le ralentissement général de l'économie.
- Montée en puissance des pays émergents (Brésil, Chine).

## Recommandations

Afin d'accompagner le développement de la filière, il est nécessaire de soutenir la formation des compétences nécessaires à la géophysique, au forage et à la construction en mer.

## Liens avec d'autres technologies clés

46

56

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 54. Technologies de raffinage des hydrocarbures

### Description

Les techniques de raffinage permettant la fabrication de produits pétroliers à partir de ressources conventionnelles ou non conventionnelles sont de trois grands types :

- les procédés de séparation : distillation atmosphérique, distillation sous vide, désasphaltage, extraction et cristallisation ;
- les procédés de conversion : reformage, alkylation, isomérisation, craquage catalytique, hydrocraquage et viscoréduction ;
- les procédés d'épuration : dessalage et désulfuration.

Ces technologies recouvrent les principales étapes permettant la transformation d'un mélange d'hydrocarbures en carburants, combustibles et matières premières pétrochimiques.

Les principaux développements portent sur le développement de nouveaux procédés afin d'améliorer l'efficacité énergétique, d'intégrer des bruts plus lourds et des huiles non conventionnelles, ainsi que de réduire les impacts sur l'environnement. Les verrous technologiques concernent :

- le développement des techniques de conversion profonde, d'hydrocraquage des bruts, des résidus et des distillats ;
- la réduction des teneurs en soufre et en aromatiques ;
- la mise au point de nouveaux catalyseurs à hautes performances ;
- l'amélioration des rendements des procédés pétrochimiques et la pureté des intermédiaires.

### Applications

Ces technologies sont dédiées à la production de produits pétroliers tels que les carburants, les intermédiaires pétrochimiques.

Des plus légers aux plus lourds : gaz de pétrole liquéfié (butane, propane, etc.), supercarburants, bases pétrochimiques (gaz, naphta), solvants (white spirit, pétrole lampant), carburéacteurs (kérosène), gazole, fioul domestique, lubrifiants, cires et paraffines, fioul lourd, bitumes et bases chimiques.

Le secteur du raffinage regroupe 10 000 emplois directs en France [source : MEEDDM] et est caractérisé par sa forte concentration autour de cinq opérateurs (Esso, Ineos, Lyondellbasell, Petroplus et Total) exploitant 12 usines (sur 661 dans le monde) qui ont traité 73,7 millions de tonnes de brut en 2009 [source : UFIP].

Les dépenses mondiales de l'industrie du raffinage se sont élevées à 62 Md€ en 2008 [source : IFP Énergies nouvelles], dont environ un tiers pour les investissements et un autre tiers pour les catalyseurs et produits chimiques. La

demande de produits raffinés devrait continuer à augmenter, mais les capacités de raffinage dans le monde sont supérieures à la demande mondiale et devraient le rester, si l'on intègre les projets en cours à moyen terme. Une restructuration du secteur est attendue en Europe et aux États-Unis avec une baisse des capacités de raffinage et des investissements pour répondre aux renforcements des spécifications et normes d'émissions.

Les orientations structurelles du secteur sont :

- une forte décroissance du fioul lourd ;
- la poursuite de la diésélisation du parc automobile, notamment en Europe ;
- la réduction de la demande en essence ;
- une hausse de la demande en kérosène ;
- le renforcement des spécifications sur la qualité des produits (teneur en soufre) ;
- le renforcement des réglementations pesant sur les raffineries : réduction des niveaux de pollution locale en  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , etc. et globale pour le  $\text{CO}_2$  essentiellement.

### Enjeux et impacts

Le maintien d'une industrie du raffinage performante constitue un enjeu européen et national, en particulier pour des raisons de sécurité d'approvisionnement. Le développement de la filière passe par la diminution des impacts environnementaux lors des étapes de production, l'amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que l'intégration dans l'approvisionnement de bruts



#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

plus lourds et à terme de pétroles non conventionnels. La diminution des émissions de CO<sub>2</sub> repose largement sur l'amélioration de l'efficacité dans l'emploi des hydrocarbures. Les émissions de CO<sub>2</sub> du raffinage en 2008 ont représenté 4,7 % des émissions globales françaises [source : CITEPA] et elles augmentent de 2 % par an par tonne de brut traité. L'autoconsommation des raffineries est en croissance et atteint 7 % du brut traité en 2008 [source : UFIP]. Aux États-Unis, où les procédés de conversions profondes de fioul lourd sont plus développés, ce pourcentage atteint 11 à 13 %.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Énergies nouvelles, ENS-Lyon, ENSC Rennes, CRMCN (Marseille), IPCM (Strasbourg), IrceLyon, Lacco (Poitiers), Laiman (Annecy), LCC (Toulouse)
  - **Industrie** : Axens, Prosernat, Technip, Total
- Pôle de compétitivité : Axelera

### Principaux acteurs étrangers

- ABB, Actaris, BPL Global, Cisco, GE, Google, Toshiba, Hitachi, IBM, Landis et Gyr, Microsoft, Siemens

## Position de la France

La France compte avec Total un des principaux acteurs du secteur raffinage distribution en Europe et dans le monde. La filière raffinage mobilise des acteurs français, sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Il existe un écart grandissant entre la capacité de production nationale du raffinage et les besoins du marché, nécessitant l'importation de 40 % du gazole consommé en France et l'exportation de 30 % de la production d'essence et de 70 % de la production de fioul lourd (source : UFIP).

## Analyse AFOM

### Atouts

- Implication d'acteurs majeurs à forte capacité d'investissement.

### Faiblesses

- Positionnement structurel des capacités sur le raffinage d'essence en retrait par rapport au diesel.

### Opportunités

- Importants projets dans les zones à forte croissance de consommation (Asie).

### Menaces

- Surcapacités de raffinage en Europe (première zone de raffinage mondiale).

## Liens avec d'autres technologies clés

5

53

56



## Recommandations

Dans ce contexte, les pistes de réflexion sont les suivantes :

- soutenir les projets de développement de raffinage visant à améliorer l'efficacité énergétique des procédés et à réduire leur impact environnemental ;
- garantir des infrastructure logistiques et portuaires compétitives ;
- améliorer la visibilité sur les réglementations à venir tout en limitant l'empilement des nouvelles mesures.

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 55. Technologies pour l'exploration, l'extraction et les traitements des ressources minérales

### Description

Les ressources minérales peuvent être classées en trois familles de produits et nous nous intéresserons ici principalement à la première :

- les métaux ;
- les minerais extraits pour la construction (calcaire, sable, pierre naturelle, marbre, schiste...);
- les minéraux à vocation énergétique (uranium...).

Les risques de pénurie et d'épuisement des gisements de ressources minières impliquent d'en découvrir de nouveaux. Pour cela, il est nécessaire de développer des systèmes de prospection aussi performants que pour le pétrole. Les métaux ne se trouvent pas qu'en surface : une fois les gisements détectés, il reste encore à extraire les minerais et à les traiter afin d'obtenir le métal convoité.

La recherche de métaux toujours moins accessibles nécessite par conséquent le développement de nouvelles technologies pour chacun de ces trois stades :

- l'exploration de nouveaux gisements avec des systèmes géophysiques aéroportés, des équipements toujours plus sophistiqués de télédétection, des capteurs, l'imagerie par satellite.
- l'extraction : la découverte de nouveaux gisements moins « classiques » que ceux exploités depuis vingt ou trente ans va nécessiter le développement de nouvelles techniques d'extraction. On peut citer à titre d'exemple l'exploitation des grands fonds marins avec des besoins notamment en robotique.
- le traitement des minerais : la voie biologique est à explorer. La biolixiviation se sert des micro-organismes pour transformer les minéraux solides en une forme soluble et permet au minéral de se séparer de la matière solide qui l'entoure. Ainsi certaines souches de bactéries sont très efficaces pour désagréger le minéral sulfuré : elles sont donc utilisées pour départager l'or des roches pyritiques et pour la lixiviation biologique du cuivre<sup>17</sup>, du cobalt<sup>20</sup>. De plus, la plupart des procédés de traitement commencent par une opération de broyage fin qui est très énergivore. Des recherches vers de nouvelles techniques de comminution plus efficaces sont à développer.

### Applications

Les métaux trouvent leurs usages dans tous les secteurs de l'industrie ou presque.

Les plus beaux gisements de ressources minérales ont été découverts dans les années 1970-1980 et exploités intensivement entre 1986 et 2006 environ. Les prix étaient alors bas pour des ressources abondantes. Depuis, les ressources s'amenuisent, notamment parce que la Chine importe massivement. Les cours ont donc fortement aug-

menté. La crise a légèrement stoppé cette flambée des prix, mais celle-ci demeure latente.

Il devient donc indispensable de découvrir de nouveaux gisements, plus difficilement accessibles peut-être. La Chine s'est aussi mise à chercher des gisements.

Excepté le nickel de Nouvelle-Calédonie, la production de minerai a disparu en France.

### Enjeux et impacts

Les phénomènes croisés d'épuisement des gisements exploités jusqu'à présent et d'explosion des besoins (depuis 2006) constituent un enjeu à l'échelle mondiale : celui de garantir la production.

La hausse des coûts des matières premières est liée à l'épuisement des gisements, mais parfois aussi à des contextes géopolitiques tendus, plus ou moins difficiles à prévoir. Pour ces raisons, trouver de nouveaux gisements à exploiter fait partie des solutions qui permettraient de sécuriser les approvisionnements de ces matières premières. Une autre solution passe par des efforts à mener sur le recyclage des métaux (notamment rares) : certains parlent alors de l'exploitation des nouvelles « mines urbaines », *i.e.* les déchetteries.

Les techniques de traitement des minerais doivent être améliorées car leur impact sur l'environnement est conséquent. Au Canada par exemple, pour chaque tonne de cuivre extraite, 99 tonnes de matières superflues (roche ne contenant pas de minerai) sont produites. L'industrie minière canadienne produit donc à elle seule 1 650 000 tonnes de matières superflues par jour générant ainsi 650 millions de tonnes de déchets par an. Or les roches sont bien souvent traitées à l'acide afin d'extraire les minéraux. Les roches superflues contiennent des sulfures provenant de l'acide, des métaux lourds et d'autres polluants. Elles sont ensuite entassées sur de vastes étendues près des mines, exposées à l'air et à l'eau. De l'acide sulfurique peut être généré et filtrer de la roche pendant des centaines, voire des milliers d'années. Il s'infiltrer dans les cours d'eau, les nappes... C'est le phénomène de drainage minier acide (DMA). L'eau peut aussi être contaminée par les métaux (arsenic, cobalt, plomb, cadmium...) et par les produits chimiques utilisés sur le site. Il est aussi très important de bien étudier le site et de limiter l'impact de l'érosion et de la sédimentation.

En plus de la pollution, la quantité d'eau nécessaire au traitement des minerais est aussi très importante. Mais il n'est pas nécessaire d'utiliser de l'eau potable pour ces traitements : la qualité de l'eau doit être adaptée à l'usage.

Sous l'impulsion de l'Allemagne, l'Europe a lancé le programme RMI (*Raw Material Initiative*) pour :

#### Degré de diffusion dans l'absolu

	Faible diffusion
	Diffusion croissante
	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

	Faible diffusion
	Diffusion croissante
	Généralisation

- le développement d'entreprises minières en Europe ;
- le développement des relations avec l'Afrique ;
- la prise en compte des problèmes d'environnement et de recyclage.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- BRGM, Ifremer, Mines Paris Tech
- Eramet, Areva (Business Unit Mines), Imerys.
- Pôle Dream Eau & Milieux, pour les aspects réduction des volumes d'eau utilisés et réduction des impacts environnementaux

### Principaux acteurs étrangers

- BHP Billiton, Vale S. A., Rio Tinto, ArcelorMittal, Anglo American Plc, Xstrata Plc, RWE AG, Mitsubishi Corp, Barrick Gold Corporation, Potash Corporation of Saskatchewan Inc., Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc, Southern Copper Corp, Mosaic Co, Sasol Ltd, Newmont Mining Corp, Wesfarmers LTD...

## Position de la France

On trouve des acteurs américains, australiens, canadiens et suédois mais quasiment pas d'acteurs français. Les Suédois et les Finlandais sont équipés d'équipements géophysiques aéroportés mais on ne trouve pas l'équivalent ailleurs en Europe. Ils investissent aussi dans les équipements d'extraction et notamment dans la robotique, qui permet de travailler plus longtemps. La France est donc globalement en retard, du moins sur la présence d'acteurs industriels.

## Analyse AFOM

### Atouts

Le savoir-faire du BRGM qui souhaite créer son école.

### Faiblesses

Peu d'acteurs, pas de gisements sur le territoire.

### Opportunités

Le programme européen RMI.

### Menaces

Concurrence des pays étrangers qui, de plus, bénéficient parfois de gisements sur leur propre territoire (Canada, USA...).

## Recommandations

En France, le développement de programmes ANR pourrait permettre de renforcer la position française sur ce volet.

Sur le volet formation, une action structurante est à mener pour pallier une raréfaction des compétences disponibles dans le domaine des géosciences.

Le renouveau d'attention apporté aux terres rares eu égard à leur emploi croissant dans des technologies énergétiques (batteries) et non énergétiques, doit être encouragé.

## Liens avec d'autres technologies clés

13

31

36

37

40

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input checked="" type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 56. Carburants de synthèse issus de ressources fossiles

### Description

Les carburants de synthèse liquides sont produits à partir de ressources telles que le charbon (CtL : « Coal to Liquids ») ou le gaz naturel (GtL : « Gas to Liquids »). Ces filières reposent sur des procédés thermochimiques et catalytiques.

Les procédés CtL et GtL reposent sur la conversion par voie thermochimique qui peut être directe ou indirecte. Dans les deux cas, l'objectif est d'augmenter la proportion d'hydrogène du composé initial par rapport aux atomes de carbone (H/C) à un coût énergétique raisonnable.

La liquéfaction indirecte requiert une première étape de pyrolyse-gazéification à partir du charbon. Lorsque la matière première est du gaz naturel, cette étape n'est pas nécessaire. Le gaz naturel est converti par reformage dans un gazéifieur à 1 400 - 1 600°C en gaz de synthèse (H<sub>2</sub> + CO). Il est ensuite purifié et transformé en hydrocarbures liquides (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) par synthèse Fischer-Tropsch (FT). Après séparation et raffinage, les carburants liquides ont des propriétés similaires au diesel ou au kérosène. D'autres composés tels que le méthanol ou le diméthylether (DME) peuvent être synthétisés.

La transformation directe du charbon consiste à pulvériser le charbon solide et à le mélanger à un solvant pour le liquéfier à 400-450° C. Le liquide obtenu est hydrogéné et raffiné pour obtenir du carburant liquide.

Le rendement des procédés dépend notamment de la qualité des matières carbonées utilisées. Pour le CtL, le rendement peut atteindre 60 % en masse [source : AIE].

Bien que les technologies CtL et GtL soient commercialisées, de la recherche est nécessaire dans la chaîne de traitement (purification), ainsi que pour diminuer les coûts et améliorer le rendement des procédés et augmenter la qualité des carburants synthétisés par l'optimisation des catalyseurs lors de la synthèse Fischer-Tropsch. Le captage de CO<sub>2</sub> est également un axe de recherche : environ une tonne de CO<sub>2</sub> étant émise pour chaque baril CtL produit.

### Applications

Les carburants synthétisés issus du CtL sont principalement employés pour le secteur automobile. Ils sont particulièrement recherchés par les pays ayant des ressources en charbon et relativement peu ou pas en hydrocarbures (Afrique du Sud, Australie, Chine).

Les produits issus de la voie GtL relèvent d'une autre logique, ils sont surtout utilisés pour produire du naphta,

des lubrifiants et des carburants synthétiques pour la formule 1 ou l'aéronautique.

Le marché est actuellement embryonnaire, plusieurs projets au niveau international sont en cours.

Le coût d'une usine de liquéfaction est de l'ordre de 5 Md\$ [source : AIE]. La plus grande usine de liquéfaction de gaz est en construction au Qatar par Shell, elle devrait produire jusqu'à 140 000 barils par jour. Son coût initial de 5 Md\$ a été revu à la hausse au cours du chantier et pourrait atteindre 19 Md\$ [source : Shell]. Le retour sur investissement est très dépendant du cours du pétrole.

La maîtrise des émissions de CO<sub>2</sub> est un facteur clé pour le développement du marché [source : AIE Energy Technology Network]. Les usines CtL demandent à être implantées de façon proche des sources d'approvisionnement en charbon. Une seconde contrainte d'implantation est la proximité de zones de stockage du CO<sub>2</sub> capturé, lorsque cette technologie sera disponible : réservoirs épuisés de pétrole ou de gaz, puits de pétrole à taux de récupération amélioré (EOR). Le dernier cas représente une voie de valorisation, l'injection de CO<sub>2</sub> permettant d'améliorer le taux de récupération d'hydrocarbures dans le réservoir.

Le CtL devient économiquement rentable à partir d'un prix du baril de pétrole de 60 à 100 \$ [source : AIE], en tenant compte de paramètres tels que le prix et de la qualité du charbon, de l'emplacement de l'usine. Une usine CtL produisant 60 000 barils de diesel ou d'essence par jour nécessite un investissement de 4,1 Md\$ [source : ETSAP AIE], tandis qu'une usine GtL devrait coûter moitié prix, étant donné que les étapes de préparation et de gazéification du charbon représentent 50 % du coût total d'une installation. Pour être complets, il est nécessaire d'intégrer dans le coût du CtL les émissions de CO<sub>2</sub> qui sont associées à sa production.

L'AIE estime qu'à partir de 2030, la production de CtL devrait augmenter significativement et qu'en 2050 environ 2 000 Mtep de charbon seront consommés par les usines CtL. La production de GtL augmentera également. Les principaux projets d'usines CtL sont aux États-Unis et en Chine.

La production de carburant à partir de charbon est évaluée à 60 000 barils par jour en 2015 aux États-Unis [source : US Energy Intelligence Agency] et à 740 000 barils par jour en Chine [source : China Coal Information Institute]. Le principal pays producteur de carburants CtL reste néanmoins à ce jour l'Afrique du Sud, dont 30 % des besoins en produits pétroliers sont couverts par cette filière.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Enjeux et impacts

La volatilité des cours du baril de pétrole et des considérations de sécurité d'approvisionnement en énergie stimulent l'intérêt pour les carburants de synthèse liquides. Le principal enjeu est la substitution des carburants de synthèse aux carburants issus d'hydrocarbures liquides.

Une évaluation complète des coûts, intégrant les coûts d'extraction environnementaux est nécessaire pour s'assurer de la rentabilité des procédés. Du point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>, le bilan du puits à la roue du CtL est [source AIE] :

- 560 g de CO<sub>2</sub>éq/km sans captage et séquestration du CO<sub>2</sub>, soit environ le double du diesel ;
- 300 g de CO<sub>2</sub>éq/km avec captage et séquestration du CO<sub>2</sub>.

Le développement de la filière se fera à l'international, notamment en Chine et en Inde qui coopèrent dans le cadre de projets de développement.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Énergies nouvelles
- **Industrie** : Air Liquide/Lurgi, Axens, Total

### Principaux acteurs étrangers

- BP, Headwaters Technology Innovation Group, Sasol, Shell, Uhde (ThyssenKrupp)

## Position de la France

La France dispose d'acteurs majeurs dans le domaine de la production de carburants de synthèse et le transfert entre recherche et industrie est développé. Néanmoins, la plupart des projets sont implantés à l'international, notamment en Afrique du Sud qui occupe une place de leader, et de plus en plus en Chine et aux États-Unis.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Synergie entre les compétences académiques et l'industrie.
- Implication d'acteurs majeurs.

### Faiblesses

- Faible nombre d'acteurs.
- Absence de gisements exploités de gaz ou de charbon sur le territoire.

### Opportunités

- Un marché mondial en développement.

### Menaces

- Filière structurée et déjà exportatrice en Afrique du Sud.

## Recommandations

Face à l'émergence de quelques grands projets industriels dans les filières CtL et GtL, il s'agit avant tout d'accompagner la structuration de la filière (réseau national) et de soutenir l'exportation des savoir-faire et des technologies.

## Liens avec d'autres technologies clés

5

53

54

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



## 57. Biomasse et déchets : valorisation énergétique



### Description

Les technologies de valorisation énergétique de la biomasse et des déchets, qu'ils soient urbains, industriels ou agricoles, relèvent de trois filières :

- L'oxydation totale par combustion, incinération ou oxydation en voie humide (OVH), qui consiste à transformer intégralement la matière de base par réaction exothermique à l'aide d'un agent oxydant - de type oxygène ou tout autre oxyde métallique - à pression atmosphérique ou sous pression, puis à traiter les effluents avant rejet dans le milieu naturel ;
- Le traitement par voie humide de la biomasse non ligneuse et des déchets par méthanisation, qui consiste en une digestion anaérobie de la matière organique réalisée dans un digesteur. Le gaz obtenu, appelé biogaz, peut servir à produire de la chaleur et/ou de l'électricité ou bien être épuré en vue d'une injection dans le réseau de gaz naturel ou d'une utilisation en biométhane carburant (composition identique en GNV). Le résidu solide (digestat) peut par exemple être, utilisé comme amendement organique en agriculture, composté ;
- La décomposition et/ou transformation thermochimique par pyrolyse et/ou par gazéification, qui consiste à décomposer, sous l'effet de la chaleur, la matière par réaction endothermique. Cette décomposition de la matière en phases solide, liquide et gazeuse constitue la pyrolyse qui peut être suivie d'une étape de gazéification en

un gaz de synthèse ( $H_2 + CO$ ) à l'aide d'un agent gazéifiant (air,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ) ;

On peut coupler ces filières aux technologies de stockage et transport de la chaleur, qui trouvent leurs applications dans plusieurs secteurs (industrie, habitat, tertiaire). Ces technologies, déjà largement déployées, font l'objet de développements pour adapter la production de chaleur à la demande par le stockage et le transport à longue distance.

Les technologies d'oxydation totale et de pyrolyse, dérivée du procédé de fabrication de charbon de bois, sont relativement matures. Des améliorations des procédés sont cependant probables ; elles apporteront une augmentation du rendement électrique et une diminution des émissions. La méthanisation est très courante en Europe du nord et commence à se développer plus largement en France. La gazéification reste moins développée. Des développements sont attendus afin de :

- améliorer le contrôle des procédés et l'efficacité ;
- purifier le gaz avant transformation en énergie ;
- adapter la conception des unités aux caractéristiques de la charge ;
- augmenter le rendement énergétique ;
- développer des solutions polyvalentes au regard de l'hétérogénéité de la charge disponible et de ses caractéristiques ;
- optimiser la logistique (filières d'approvisionnement) et l'emplacement des sites de valorisation énergétique.

### Applications

Ces technologies sont plus particulièrement destinées à la destruction des déchets et à la valorisation directe de la chaleur, et/ou la production d'électricité ou comme carburant véhicule.

L'Union européenne génère chaque année quelques deux milliards de tonnes de déchets de toutes origines, en augmentation de 10 % sur les dix dernières années. En France, la production de déchets en 2001 était de l'ordre de 22 à 25 millions de tonnes avec une croissance de 1 % par an tandis que le potentiel de déchets d'origine végétale (biomasse) pour une valorisation énergétique représente 90 millions de tonnes en France, incluant la sylviculture (17 millions de tonnes) et les déchets de l'industrie du grain (19 millions de tonnes) [source : Ademe].

Les effets de la taille sur le coût de production de l'énergie sont importants. La taille des installations varie en fonction des ressources disponibles et des caractéristiques de la demande en énergie :

- les grandes unités de production d'électricité sont supérieures à 100 MW, en co-combustion avec des combustibles fossiles ;

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

- les unités petites et moyennes de cogénération autour de 20 MW ;
- les unités de production de chaleur pour les communes.

Le marché fait l'objet de plusieurs formes de soutien public : appels d'offres pour la construction de centrales de production d'électricité à partir de biomasse ; fonds chaleur renouvelable qui vise 1 100 ktep issues de la biomasse en 2012 et 3 800 ktep en 2020 ; programmation pluriannuelle des investissements (PPI) de production de chaleur et d'électricité à partir de biogaz (filrière méthanisation).

## Enjeux et impacts

Les principaux enjeux concernent la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la contribution à l'indépendance énergétique de la France. La biomasse, hors biocarburants, représente plus du tiers du potentiel de développement des énergies renouvelables en France à l'horizon 2020, soit 7,5 Mtep sur 20 Mtep [source : MEEDDM].

En France, la biomasse est principalement utilisée pour la production thermique dans les secteurs résidentiels et tertiaire, et ensuite pour la production d'électricité. Le potentiel de biomasse mobilisable pour la production de chaleur, d'électricité et d'hydrogène et de biocarburants est estimé à plus de 30 Mtep [source : Prospective Ademe 2004].

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : Cemagref, Ceva, Fédération Jacques Villermaux, Gremi (Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés), IFP Énergies nouvelles, Inra/LBE, LSGC Nancy
- **Industrie** : Air Liquide, Areva Bioenergies, Bionersis, Europlasma, GDF-Suez, Naskeo, Proserpol, SAUR, Veolia
- **Pôles de compétitivité** : Capenergies, DREAM Eau & Milieux, Tenerdis

### Principaux acteurs étrangers

- Caterpillar, GE Energy, MWM, Schmack Biogas, Viessmann Werke

## Position de la France

La France dispose d'acteurs académiques et le monde de la recherche s'est structuré : l'ANR a lancé un programme bioénergies en 2008 et depuis 2005 le programme national de recherche sur les bioénergies (PNRB) coordonne les projets.

La filière française présente un retard dans le déploiement des technologies par rapport à ses partenaires européens, Allemands, Suédois et Autrichiens notamment.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Des mécanismes de soutien sont mis en place pour soutenir la filière (BCIAT 2011).
- Un gisement de bois-énergie de premier ordre.

### Faiblesses

- Une filière atomisée sans réel leader.
- Un retard conséquent dans le déploiement des technologies (méthanisation notamment).

### Opportunités

- Localisation forte des ressources sur un territoire donné.

### Menaces

- Compétition forte des constructeurs d'équipements étrangers.

## Recommandations

La diffusion des technologies de valorisation énergétique de la biomasse et des déchets nécessite le renforcement des incitations réglementaires aux travers de la réévaluation du tarif d'achat, notamment pour l'électricité produite à partir de biogaz, à l'exemple de l'Allemagne et de la Suisse.

L'efficacité globale de la chaîne de valorisation énergétique doit être renforcée par une optimisation à chaque étape des procédés et équipements. En aval, un point sensible se situe au niveau des émissions polluantes (particules, notamment), pour lesquelles les normes d'émission tendent à devenir plus contraignantes.

## Liens avec d'autres technologies clés

3

39

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## BIBLIOGRAPHIE

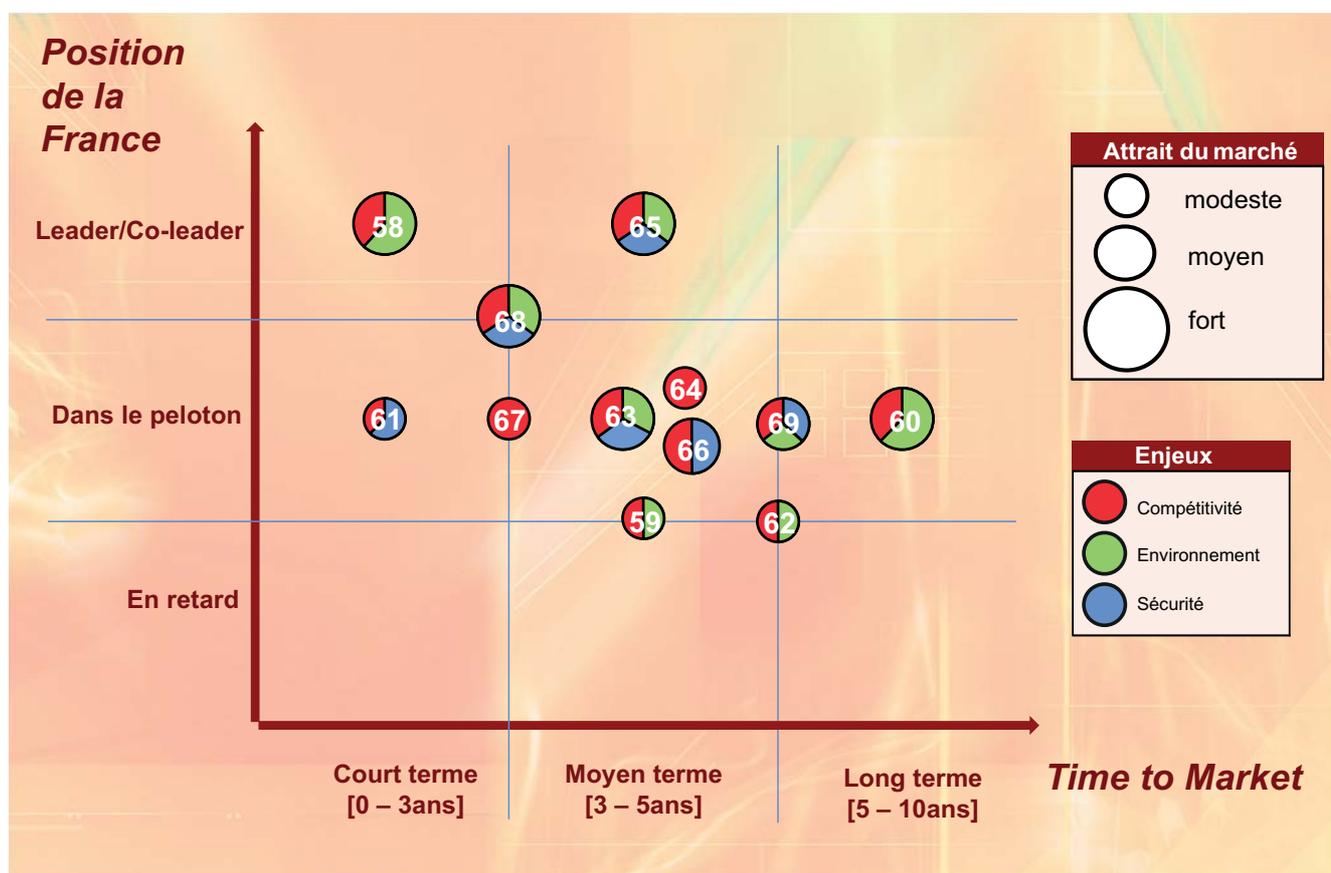
- Agence internationale de l'énergie, *Energy Technology Perspectives*, 2010
- Bulletin de diffusion de l'Agence internationale de l'énergie, *ETSAP - Technology brief*, 2010. [www.etsap.org](http://www.etsap.org)
- Commissariat général au développement durable, *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, 2010. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- EurObserv'ER, *État des énergies renouvelables en Europe*, 2010. [www.energies-renouvelables.org](http://www.energies-renouvelables.org)
- Rapport du MEDEF, *Nouvelles énergies, nouvelles technologies*, 2010. [www.medef.fr](http://www.medef.fr)
- Christian Bataille et Claude Birraux, *Évaluation de la stratégie nationale de recherche en matière d'énergie*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2009
- Présentation de l'ANR, *Un premier bilan des programmes ANR sur les nouvelles technologies de l'énergie*, 2009. [www.agence-nationale-recherche.fr](http://www.agence-nationale-recherche.fr)
- Feuille de route de la Commission européenne : *SET-Plan Technology map : Technology Descriptions*, 2009
- Étude de l'OMPI, *Patent-based Technology Analysis Report - Alternative Energy Technology*, 2009. [www.wipo.org](http://www.wipo.org)
- Rapport de synthèse DGEC, *Scénario énergétique de référence DGEMP-OE*, 2008. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- Comités opérationnels du Grenelle de l'environnement, *Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale*, 2008. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- Feuille de route des énergies renouvelables de l'European Renewable Energy Council, *20% pour 2020*, 2008. [www.erec.org](http://www.erec.org)
- Rapport de la Commission énergie du centre d'analyse stratégique, *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, 2007. [www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)
- Ministère de l'Économie et des Finances, ministère délégué à l'Enseignement supérieur et à la Recherche, *Rapport sur la stratégie nationale de recherche dans le domaine énergétique*, 2007
- Christian Bataille et Claude Birraux, *Les nouvelles technologies de l'énergie et la séquestration du dioxyde de carbone : aspects scientifiques et techniques*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2006
- Feuille de route de l'Ademe, *Biocarburants de 2<sup>e</sup> génération*, 2010. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Appel à projet de l'ANR, *Programme bioénergies*, 2010. [www.agence-nationale-recherche.fr](http://www.agence-nationale-recherche.fr)
- Rapport de l'Agence internationale de l'énergie, *Sustainable production of second-generation biofuels*, 2009. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Concentrating solar power*, 2010. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Feuille de route de l'Ademe, *Énergies renouvelables marines*, 2010. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Feuille de route de l'European Ocean Energy Association, *European ocean energy roadmap 2010-2050*, 2010. [www.eu-oea.com](http://www.eu-oea.com)
- Feuille de route de l'Ademe, *Captage, transport et stockage géologique du CO<sub>2</sub>*, 2010. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Rapport de l'AIE au sommet du G8 de Muskoka, *Carbon capture and storage : progress and next steps*, 2010. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Carbon capture and storage*, 2009. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Rapport de la Commission européenne : *SNETP - Strategic Research Agenda*, 2009. [ec.europa.eu/research/energy](http://ec.europa.eu/research/energy)
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Solar photovoltaic energy*, 2009. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Étude de l'EPIA, *Global market outlook for photovoltaic until 2014*, 2010. [www.epia.org](http://www.epia.org)
- Étude *The European offshore wind industry - key trends and statistics 2009*, 2010. [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie *Wind energy*, 2009. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Rapport du Carbon Trust, *Offshore wind power : bid challenge, big opportunity*, 2010. [www.carbontrust.co.uk](http://www.carbontrust.co.uk)
- Note de synthèse du bureau de coordination énergie éolienne, *L'éolien offshore en Allemagne*, 2009.
- Présentation du BRGM, *La géothermie en Europe et dans le monde*, [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)
- Présentation du BRGM, *France 2025 - diagnostic stratégique : ressources rares et environnement*, [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)
- Étude de Geothermal Energy Association, *Geothermal energy : international market update*, 2010. [www.geothermal-energy.org](http://www.geothermal-energy.org)
- Présentation de Bernard Multon, *Stockage de l'énergie électrique pour la production décentralisée d'électricité*, 2009
- Feuille de route de l'Ademe, *Les réseaux et systèmes électriques intelligents intégrant les énergies renouvelables*, 2010. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Rapport de la Commission européenne : *European smartgrids technology platform : vision and strategy for Europe's electricity networks of the future*, 2006. [ec.europa.eu/research/energy](http://ec.europa.eu/research/energy)
- Rapport du MEEDDM, *L'industrie pétrolière et gazière en 2009*, 2010. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- Rapport de l'IFP Énergies nouvelles, *Les investissements en exploration-production et raffinage*, 2009. [www.ifp.fr](http://www.ifp.fr)
- Communication de l'UFIP, *Les mutations du raffinage français*, 2010. [www.ufip.fr](http://www.ufip.fr)
- Actes de colloque Agence internationale de l'énergie/CIAB : *Coal-to-liquids - an alternative oil supply ?* 2006. [www.iea.org](http://www.iea.org)

# Transport



# Transports

- 58. Moteurs à combustion interne
- 59. Moteurs électrique
- 60. Nouvelles technologies de turbomachine
- 61. Interaction homme-machine, ergonomie
- 62. Optimisation de la chaîne logistique
- 63. Technologies de stockage et de gestion à bord de l'énergie électrique
- 64. Électronique de puissance
- 65. Mécatronique
- 66. Communications et données
- 67. Démarche d'optimisation de l'ingénierie et de la production
- 68. Matériaux et technologie d'assemblage pour l'allègement
- 69. Outils et méthode de conception et de validation



## Contexte et enjeux

Le domaine des transports tels que nous le considérons ici comprend l'ensemble des filières modales, des opérateurs d'infrastructures, ainsi que les filières de la logistique et du transport de passagers.

### Les transports en chiffres

Le secteur des transports représente un gisement d'emploi considérable sur l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis la production des sous-ensembles et des véhicules aux services de transport et de logistique, en passant par la conception, la mise en place, la gestion et la maintenance des systèmes et infrastructures de transport.

L'industrie des transports représente 10,6 % de la valeur ajoutée des produits manufacturés en Europe et 8,5 % des emplois industriels. En France, il s'agit du deuxième secteur industriel derrière l'agroalimentaire en chiffre d'affaires, le premier en valeur ajoutée. En 2005, la valeur ajoutée de l'industrie des transports était de 181 Mds€ en Europe (UE27) ; elle représente 17 % des exportations européennes. C'est également un des secteurs qui compte le moins de PME, qui représentaient, en 2005, 20 % des emplois du secteur. [Eurostat].

En 2010, la statistique industrielle estime à 347 000 le nombre d'emplois directs dans l'industrie de construction des matériels de transport en France, pour un chiffre d'affaires de 135,7 Mds€. En 2007, les PME représentaient 34 % des effectifs du secteur. Si la production industrielle dans le domaine est en décroissance en raison de la crise économique depuis 2008, force est de constater que l'indice de production industrielle a décliné dans le secteur de 15 à 20 % depuis 2005. Cette décroissance est principalement causée par le secteur automobile.

Enfin, selon ERRAC [5.28], la demande globale de transport passager en Europe devrait passer de 5 400 Mds km-passagers en 2 000 à 7 500 Mds km-passagers en 2020. Sur le même intervalle de temps, il devrait croître de 70 % pour les marchandises pour s'établir à 6 000 Mds tonnes-km.

### Le secteur routier

Le secteur routier présente des enjeux majeurs tant en termes d'activité économique directe que de société et d'aménagement du territoire.

L'industrie de la construction automobile représente en France plus de 737 000 emplois directs et indirects [5.21] et subit depuis 2005 une érosion constante de la production industrielle. Elle génère également près de 700 000 emplois liés à l'usage (garages, assurance, contrôle technique, vente de carburant, auto-écoles...).

Sur le plan industriel, le paysage est marqué en France par la présence de deux constructeurs nationaux, Renault et PSA Peugeot-Citroën, produisant au total près de 5 millions de véhicules par an dans le monde, des équipementiers automobile de rang 1, dont la clientèle est internationale (Valeo, Faurecia, Michelin...), et des implantations françaises de constructeurs et équipementiers

étrangers (Toyota, Continental, Delphi, Robert Bosch, etc.). Dans le domaine des véhicules industriels ou collectifs également, la France possède quelques acteurs comme Renault Trucks (groupe Volvo), Irisbus, Lohr, Manitou... pour une production de véhicules de 60 000 véhicules par an en régime de croisière, seulement 20 000 en 2009, selon le CCF. La production de Renault Trucks est concentrée en France.

Il est à noter que, en dépit de la baisse de la production en France, l'automobile présente un solde commercial nettement excédentaire.

Pour ce qui est du transport proprement dit, on estime le nombre d'emplois dédiés à environ 1 million, soit les entreprises de transport routier (marchandises et passagers), les taxis, la construction et la gestion des infrastructures.

Au total, la filière du transport routier génère environ 2,5 millions d'emplois (20 % des emplois du secteur en Europe) avec un chiffre d'affaires global croissant régulièrement. Le chiffre d'affaires du transport routier en France s'établit à 44 Mds€.

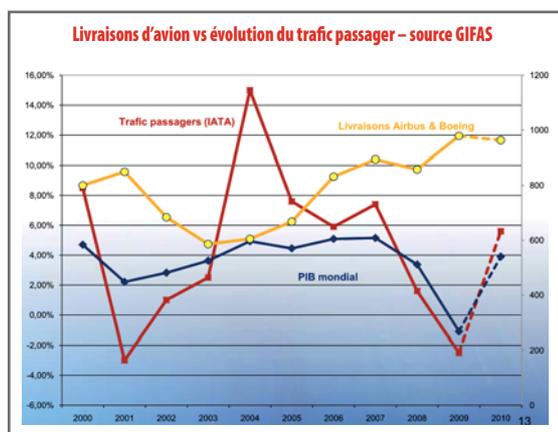
Enfin, le trafic routier est en constante augmentation. Des évaluations de l'Inrets montrent que le trafic routier français, qui était de l'ordre de 500 Mds km en 2005, pourrait atteindre 700 Mds km en 2020.

### Le secteur aéronautique et spatial

Le secteur aéronautique français est concentré autour de quelques constructeurs d'avions et d'équipementiers de rang 1. En la matière, la position de la France dans le monde est de première importance, en lien avec ses partenaires européens. La France est le premier pays européen, avec 157 000 emplois directs dans l'industrie, pour un chiffre d'affaires estimé à 36 Mds€ en 2009, dont 80 % à l'export. L'industrie aéronautique pèse ainsi pour 14 Mds€ positifs dans le solde du commerce extérieur. 76 % du chiffre d'affaires concerne les activités civiles. Depuis la chute de production du début des années 2000, les livraisons d'avions par Airbus et Boeing sont en constante augmentation et atteignent aujourd'hui le millier d'appareils par an pour un trafic passager également continuellement croissant : le trafic aérien français est en constante augmentation pour atteindre plus de 150 millions de passagers en 2008. [Eurostat].

Dans le domaine du transport proprement dit, Air France KLM est un des leaders mondiaux du transport de passagers et de fret avec plus de 400 avions exploités, 104 000 employés et un chiffre d'affaires de 21 Mds€ dans le monde.

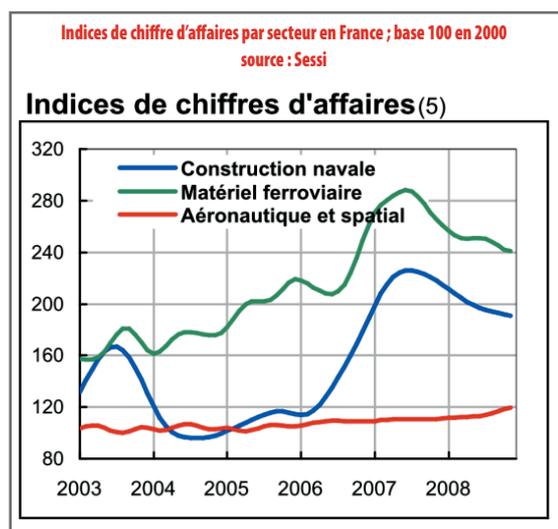
Enfin, le marché mondial des services de maintenance aéronautique était estimé en 2008 à 120 Mds\$ [5.38].



Les acteurs français sont des leaders mondiaux dans l'industrie : EADS (Airbus, Eurocopter, Astrium...), Zodiac, Safran (Snecma, Hispano-Suiza, Messier-Bugatti...), Dassault Aviation, Ariespace, Thales, Onera...  
L'industrie spatiale française est également une industrie de pointe au niveau européen, avec des acteurs majeurs comme EADS Astrium, Thales Alenia Space, le CNES ou Ariespace qui à elle seule réalise un chiffre d'affaires de plus de 1 Md€.

## Le secteur ferroviaire

La France est le deuxième pays européen pour la construction de matériel ferroviaire derrière l'Allemagne, avec un chiffre d'affaires de 5 Mds€ en 2007 et 15 000 emplois directs [Sessi, Eurostat].  
L'industrie ferroviaire a connu la plus forte croissance depuis 2000 parmi les industries du transport.

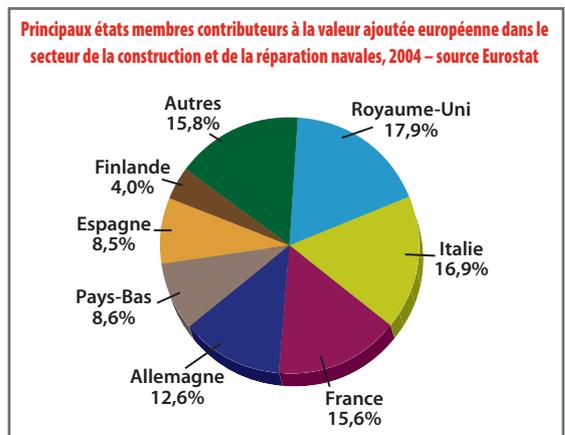


Le paysage industriel français est structuré autour de quelques grands constructeurs français (Alstom) ou étrangers (Bombardier, Siemens transportation), et d'équipementiers (Faiveley, Neotec...)  
Les opérateurs de transport français tels la SNCF ou Veolia prennent des positions à l'international sur le fret ou le transport de

passagers. Cette évolution est rendue possible par l'ouverture à la concurrence du fret ferroviaire depuis 2006, et du transport de passagers depuis 2010.

## Le secteur naval

L'industrie navale française représente – hors plaisance – un chiffre d'affaires cumulé de l'ordre de 5 Mds€, soit moins de 1% de l'industrie manufacturière française. La France est un des premiers pays de l'Union européenne dans la construction navale, mais reste très loin derrière des pays comme la Norvège et Malte en Europe, ou encore la Corée sur le marché des porte-containers.



En France, les grands chantiers (STX ou DCNS par exemple) possèdent une expertise reconnue sur les bateaux de croisière et les navires pour la défense. L'activité de construction des porte-containers est, elle, largement prise par les chantiers asiatiques. Au-delà de ces grandes catégories, des chantiers plus petits possèdent un savoir-faire reconnu sur les navires spéciaux. L'innovation est vue comme un enjeu stratégique pour maintenir et développer l'activité de ces chantiers alors que la production navale européenne a chuté depuis le début des années 1990 de près de 80% quand la production industrielle de l'UE27 croissait dans le même temps de 35% environ [Eurostat].  
Le transport maritime français emploie en France près de 20 000 personnes pour une flotte de 626 navires au 1<sup>er</sup> janvier 2010, en forte hausse par rapport à début 2009.  
L'industrie du nautisme (plaisance) est une des premières dans le monde. La filière en France (y compris loueurs, ports de plaisance...) représente quelque 45 000 salariés dans 5 000 entreprises, pour un chiffre d'affaires de 5 Mds€ [5.32].

## Le transport et la logistique

La filière transports et logistique représente une force économique importante en France avec des opérateurs de premier plan, tant dans les opérateurs de plateformes (ADP, Port du Havre, etc.) que des transporteurs (Norbert Dentressangle, Geodis, SNCF Fret...). Les opérateurs de la logistique sont notamment fédérés autour de l'Association française pour la logistique (ASLOG) et du pôle Nov@log.

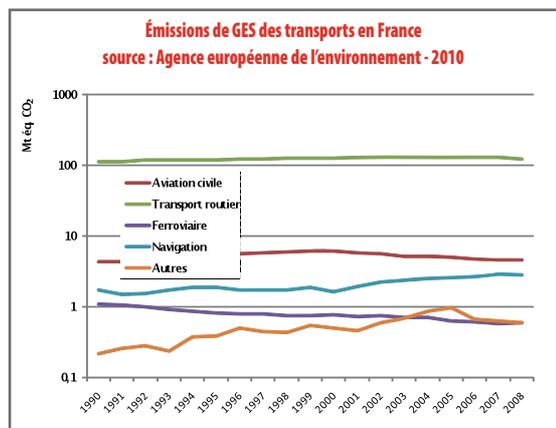
Le transport représente 46 % des emplois de la filière transports et logistique qui totalisait en 2006 1,6 million d'emplois [5.6].

## Enjeux transversaux

Les transports se trouvent aujourd'hui au cœur des questions posées à la société sur son appréhension du développement durable, dans toutes ses composantes : environnementale, sociale, économique. La question de la mobilité des personnes et de la gestion durable des transports de marchandise fait ainsi face à de grands enjeux transversaux largement interdépendants.

### Des enjeux environnementaux partagés

Sur le plan environnemental, le transport est identifié en France et dans le monde comme l'un des principaux contributeurs à la pollution atmosphérique et aux émissions de gaz à effet de serre, responsables pour l'essentiel de l'élévation globale de température liées aux activités humaines. La contribution du transport aux émissions de gaz à effet de serre n'a cessé de croître. Le seul transport routier est devenu le principal contributeur depuis les années 1990 (cf. monographie « Énergie ») ; si on y ajoute les autres modes de transport, la contribution des transports représente le double de celle du bâtiment ou de l'industrie.



La croissance des émissions pour le transport routier est liée à en grande partie à l'automobile. Cette croissance, bien qu'amorçant un infléchissement, est tirée par la prééminence des véhicules carbonés sur les routes, et par une périurbanisation forte pour laquelle l'offre de mobilité autre est encore peu adaptée. Ainsi, les réponses à ces enjeux seront à rechercher non seulement dans la « décarbonation » et l'électrification des véhicules, mais également dans les choix d'aménagement du territoire et d'urbanisation dans les décennies à venir.

Dans ce contexte, les objectifs que s'est donnés la France en 2003, et réaffirmés régulièrement depuis (Grenelle de l'environnement, 2007), sont de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050, pour participer à hauteur de son développement industriel à la division mondiale par deux de ces émissions.

Autre enjeu environnemental qui touche l'ensemble des modes (hors naval), la question du bruit est devenu un réel objet d'étu-

des et de préoccupation quant à ses impacts en termes de santé publique. Ainsi, chaque mode est concerné par cette question, tant les cartes de bruit établies dans villes mettent en évidence le lien entre mobilité et bruit, et ceci quel que soit le mode. Outre les questions de confort, 350 000 logements, situés proches de voies de transport, sont exposés à des niveaux élevés de bruit, avec des risques de perturbations induites : ouïe, stress, perturbation du lien social... Pour l'aviation, l'Acare se fixe comme objectif une diminution du bruit des aéronefs de 50 %.

Tant pour les questions de bruit de pollution, ainsi que pour des raisons de qualité de vie globale, la question de la mobilité – terrestre notamment – renvoie également à celle de l'urbanisme et de l'aménagement des territoires, que nous ne traiterons pas ici. Le développement des voies de communication pose cependant le problème de l'artificialisation des terres, puisque toute emprise d'une voie de communication est faite sur des terres agricoles ou naturelles.

Enfin, l'enjeu environnemental pose la question de la gestion de la fin de vie des équipements et véhicules. La recyclabilité est devenue une contrainte majeure de conception des véhicules, et la filière de déconstruction s'organise autour de chacun des modes pour gérer au mieux les ressources issues de la fin de vie, dans le cadre d'un modèle économique le plus intéressant possible.

### Les BRIC, inducteurs de changements

Sur le plan de l'économie des transports, le secteur se voit notamment mis face à deux grands défis industriels, qui ont des conséquences marquées sur la société française. Il s'agit d'une part de la délocalisation pour des raisons de coût de main d'œuvre, de ressources ou de parité de change d'une part, des déplacements des marchés vers les Bric (Brésil, Russie, Inde, Chine) d'autre part :

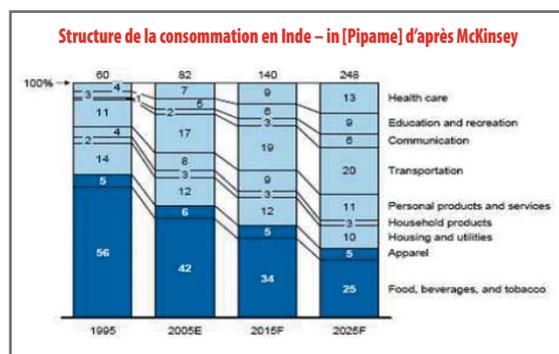
- Les coûts de main d'œuvre ont provoqué depuis de nombreuses années et continuent à induire dans l'industrie des transports, en particulier automobile, des délocalisations nombreuses, notamment pour la fabrication des petits véhicules sur lesquels les marges sont les plus faibles. Ces délocalisations, rendues nécessaires pour vendre aux prix du marché, sont cependant lourdes de conséquences en termes d'emplois en France. Outre les emplois directs, les équipementiers de rang 1 et plus sont touchés en cascade. Les PME sont plus sévèrement touchées car elles n'ont pas systématiquement les ressources pour délocaliser elles-mêmes leur production. Il est admis que ce phénomène est irréversible par les seuls mécanismes de l'économie, sans soutien public fort. La conséquence de cet état de fait est que la maîtrise de l'innovation par les groupes industriels et les PME est devenue vitale pour un maintien de l'emploi industriel – principalement qualifié – en France.

- Un phénomène apparu depuis quelques années est la montée en compétence des pays du Bric, alimenté notamment par les transferts de technologies apportés à ces pays comme contreparties à l'accès à des marchés locaux. Les exemples sont nombreux dans tous les domaines : en Chine par exemple, les collaborations entre constructeurs automobiles européens et chinois

permettent aujourd'hui à des sociétés comme BYD de proposer des véhicules complets aux normes européennes, introduisant une concurrence nouvelle à la vente sur les marchés européens, et une concurrence internationale sur la conception des véhicules. Ce phénomène est semblable dans le domaine aéronautique avec la construction d'une usine d'assemblage d'Airbus A320 en Chine. En parallèle, ces pays améliorent leurs systèmes de formation, et font former leurs étudiants en Europe ou aux États-Unis. Aujourd'hui, la concurrence de l'Inde ou de la Chine par exemple se porte aussi sur les centres de recherche ou la conception offshore. Il est donc vital pour l'industrie française de garder un temps d'avance en termes d'innovation, pour garder une part significative de valeur ajoutée en France.

- Les taux de change très favorables aux exportations en dollars poussent les acteurs, de l'aéronautique notamment, à aller vers un rééquilibrage de la production entre les zones euro et dollar. De plus en plus, une partie de la production est donc déportée en zone dollar.

- Enfin, la formidable croissance économique des Brics et autres pays en développement est en train de déplacer les marchés et de bouleverser la position des acteurs. À titre d'illustration, la structure de consommation en Inde fera de plus en plus une large place au transport. Les pays en voie de développement constituent donc aujourd'hui les principaux foyers de croissance pour les industriels du transport et les opérateurs.



Le transport de marchandises et la logistique, secteurs difficilement délocalisables, sont en concurrence, quels que soient les modes de transport.

## Qualité de conception

Une réponse aux enjeux de délocalisation réside dans l'enjeu induit que constitue la question de l'efficacité et de la qualité de conception des matériels. La conception d'un véhicule, ou d'un système, ne repose plus aujourd'hui sur un seul acteur, concentré dans un lieu géographique donné. On l'a vu avec les déboires fortement médiatisés de certains industriels : la conception comme la fabrication sont réparties entre plusieurs sites du donneur d'ordre, des bureaux d'études offshore, des sous-traitants. Par ailleurs, on l'a décrit, la diminution des coûts de conception à juste niveau de qualité reste un moyen de lutter contre la délocalisation des prestations à haute valeur ajoutée (recherche, innovation, développement).

Le travail sur les procédures et outils de conception est donc un enjeu pour l'ensemble de l'industrie des transports et des opérateurs des systèmes de transport.

## La normalisation

La normalisation constitue un enjeu globalement partagé par l'ensemble des secteurs. Elle est envisagée comme une arme économique par la Chine, les États-Unis ou le Japon. Elle est développée en Europe comme ailleurs et la présence à l'ISO, au CEN ou au CENELEC constitue des atouts stratégiques. La normalisation et la standardisation des technologies et des processus, pour ceux qui la promeuvent, est un moyen essentiel d'imposer ou de favoriser l'adoption d'une technologie et des produits et systèmes qui la mettent en œuvre.

## Les congestions

Les congestions routières, particulièrement en milieu urbain et périurbain, représentent un coût pour la société. Si le calcul de ce coût est complexe, des travaux récents [5.22] estiment à 160 M€ le coût social des congestions sur le périphérique parisien. La diminution des congestions représente donc un enjeu important pour les zones périurbaines et urbaines, tant en coût économique qu'environnemental ou sociétal. Un corollaire de cet enjeu réside également dans le développement de l'offre alternative de transport dans ces zones : véhicules légers et propres, développement de nouvelles infrastructures de transport, nouvelles règles d'urbanisme pour concentrer activité économique et habitat.

La congestion est également une source de coût dans le domaine aérien. Sur la base de ce constat, les autorités travaillent à un assouplissement des règles de circulation (ciel ouvert), qui permettra de réduire les coûts de carburant et de diminuer la congestion dans les points critiques de l'espace aérien.

## L'accessibilité

L'accès aux moyens de transport et la mobilité en général est l'objet d'une attention particulière dans une société vieillissante. La question de l'âge rejoint alors celle du handicap pour imposer de nouvelles manières de concevoir les transports, qu'il s'agisse des véhicules, des aides à la conduite ou des systèmes dans leur ensemble, pour faciliter leur accès à toutes les populations. Cette question d'accessibilité se pose aussi pour des populations « financièrement défavorisées », qui habitent souvent en périphérie des villes, et qui se trouvent fortement pénalisées dans leur mobilité.

## Enjeux spécifiques

### La sécurité routière

Malgré une diminution importante de la mortalité routière consécutive à la mise en place des contrôles de vitesse automatiques, la sécurité reste un enjeu sociétal important. En 2009, le nombre de tués sur la route est resté stable (4 273), et le nombre de blessés graves a diminué de 3,1 % à 90 934 [5.23]. Par contre, on constate en 2009 une hausse significative du nom-



bre de conducteurs de deux-roues motorisés tués (+ 9,3 %, ils représentent plus d'un quart des tués), en regard de l'augmentation de leur trafic. Les cyclistes sont aussi plus nombreux à perdre la vie sur la route. La sécurité routière est porteuse d'enjeux spécifiques liés aux nouveaux types de véhicules, électriques notamment.

Cet enjeu de sécurité concerne donc tous les véhicules routiers, dans tous les lieux, et pour tous les types d'usagers (la route est la première cause de mortalité chez les 15-24 ans).

#### **La diminution des coûts d'exploitation**

Les domaines ferroviaires et aéronautiques, ainsi que le transport routier de marchandises, voient comme primordiale la diminution des coûts d'exploitation de leurs matériels, sans remettre en cause – voire en améliorant – la qualité de service et la sécurité. La maintenance prédictive et la télémaintenance sont des voies d'amélioration de la disponibilité des matériels, basée sur une surveillance en continu des paramètres de fonctionnement.

Dans le domaine ferroviaire, cette exigence de fiabilité et de durabilité s'applique aussi à l'infrastructure. Des experts estiment aujourd'hui qu'un gain de 30 % de la durabilité des infrastructures participerait à rendre compétitif le fret ferroviaire [donnée groupes TDA 2015].

#### **Limiter les ruptures de charge**

Si l'engouement pour le ferroutage a fortement diminué, les ruptures de charges entre modes représentent cependant une perte de temps et d'argent significative. La suppression totale des ruptures de charges serait de nature à réduire le coût total des transports : on parle d'un gain potentiel de plusieurs dixièmes du coût du transport.

La rupture de charge est également un facteur de stress et de retard, et finalement de refus, pour les transports collectifs. Sur un trajet typique en région parisienne, les ruptures de charges des transports en commun (changement de bus, de métro...) représentent une part significative des temps de transport. Cet état de fait est d'autant plus dommageable qu'il touche en priorité les populations les moins aisées, éloignées des centres-ville et des centres de production par des coûts et des conditions d'accès au logement prohibitifs.

## Les grandes tendances d'évolution du secteur

### La hausse du prix du pétrole

Les évolutions à la hausse du prix du pétrole, et par conséquent des carburants, a montré la capacité de la société à s'adapter à une ressource plus chère. Durant l'année 2009, cette évolution des prix associée à la crise économique a conduit à un recul historique de 1,4 % du trafic autoroutier, particulièrement marqué pour les camions (- 2,8 %).

Cette évolution des cours et la crise économique ont renforcé la volonté des pouvoirs publics de promouvoir la voiture électrique, au même titre que les transports « plus électriques » d'une manière générale, comme un nouveau vecteur de croissance de l'activité industrielle et économique. L'électrification des véhicules, bien amorcée dans le ferroviaire, est donc devenue un enjeu majeur pour tous les acteurs industriels, comme un des moyens de diminuer la consommation de ressources fossiles. À ce titre, l'hybridation est également une voie qui aura un développement important dans les dix ans à venir.

On note que cette tendance conforte par ailleurs la recherche d'une moindre dépendance au pétrole, enjeu stratégique des nations non productrices.

### Urbanisation et évolution de la mobilité

Une urbanisation continue à l'échelle mondiale a des impacts forts sur la demande de mobilité : en 2010, le nombre de personnes vivant dans les zones urbaines a dépassé celui des personnes vivant dans les zones rurales, dans le monde. En effet, si elle tire la demande de transports en commun, cette urbanisation se traduit également par un développement fort de la périurbanisation, facteur de développement important de la mobilité individuelle faute d'une offre de transport collectif adaptée à une densité moyenne de l'habitat. Cette périurbanisation est également marquée, notamment en France, par une séparation géographique forte des centres économiques et des lieux de résidence. Une conséquence directe de cette tendance est la forte prééminence des trajets courts : 80 % des trajets font moins de 80 km. Ce constat est mis en avant par les acteurs de la filière automobile pour appuyer les développements du véhicule électrique.

Cette concentration suscite également des travaux et des réflexions autour de l'optimisation de la logistique et des transports de marchandises dans ces zones, et leur articulation avec le transport interurbain.

### L'intermodalité et la multimodalité

La promotion de l'intermodalité reste une ambition affichée des différents acteurs, mais peine à émerger en raison des contraintes économiques et d'organisation qu'elle implique. D'un dogme de l'intermodalité au début des années 2000, qui visait à proposer (imposer ?) le mode le plus « durable » ou économique selon les trajets ou parties de trajet, on est passé à une ambi-

tion de multimodalité devant le constat que des organisations intermodales généralisées sont impossibles à mettre en place avec les infrastructures actuelles et que les modes « propres » ne sont pas en mesure de répondre à la demande globale. La multimodalité prend alors comme principe de proposer un choix dans les modes là où cela est possible, dans une démarche d'optimisation de l'ensemble de la filière. Ainsi, le ferroviaire travaille à une meilleure gestion du wagon isolé et diminue le nombre de points de chargement sur le territoire afin de rendre son offre plus compétitive.

Pour le transport de passagers, force est de constater que, malgré la volonté politique de limiter l'usage de la voiture dans les grandes agglomérations, l'offre de transport en commun (en région parisienne par exemple) n'est pas aujourd'hui en mesure de répondre seule, durablement, à un changement des habitudes de mobilité ; cette amélioration devra se situer dans un contexte plus global d'information multimodale qui permettra des déplacements plus fluides (« sans couture » ou *seamless*). L'amélioration de la communication sur les conditions de transport et une réflexion sur le maillage des banlieues sont vitales dans ce cadre pour améliorer l'acceptation du transport collectif.

### L'évolution des modèles économiques

Les modèles de vente dans les transports évoluent pour plusieurs raisons : une demande de maîtrise des coûts de maintenance de la part des opérateurs et utilisateurs, le renchérissement des investissements qui rend nécessaire la ventilation du coût de manière différente. Deux exemples peuvent être cités en regard de cette assertion :

- dans l'aéronautique civile et de défense, les utilisateurs des avions utilisent de plus en plus la location avec contrat de maintenance pour disposer de leurs appareils. Ainsi, les loueurs d'avions sont parmi les premiers acheteurs, au profit de tous les types de compagnies, qui ont souvent un parc mixte de possession propre et de location ;
- dans le domaine routier, le renchérissement des véhicules traditionnels d'une part, mais également des véhicules électriques, a provoqué le développement d'offres de location longue, avec maintenance ou extension de garantie, pour maintenir l'attractivité des modèles. L'exemple emblématique en est la proposition de vente de véhicules électriques avec locations des batteries (Renault) ou de location complète du véhicule (Bluecar de Bolloré).

D'une manière générale, l'évolution des *business models* fait passer les consommateurs d'un achat de matériel à un achat de services.

De plus, l'économie de la production est elle aussi en train de changer à travers les choix stratégiques faits par les acteurs des systèmes de transport. Ainsi, dans l'industrie, les constructeurs de véhicules incorporent des métiers qu'ils ne maîtrisaient pas jusqu'ici, afin de garder la mainmise sur des briques à forte valeur ajoutée dans les véhicules. Ainsi, et à titre d'exemple, une partie de la valeur ajoutée qui portait sur le moteur à explosion se

voit reportée sur les moteurs électriques, les systèmes de batteries dans les véhicules électriques et hybrides et le contrôle système. Des constructeurs de véhicules historiques comme Renault et PSA, ou encore de nouveaux entrants (Bolloré, en association avec Pininfarina) s'attachent à maîtriser ces postes clés de la chaîne de valeur des voitures de demain et intègrent les compétences qui y sont liées.

## Des temps de transport productifs

Enfin, les différents opérateurs de transport s'attachent de plus en plus à rendre productifs les temps de transport, comme un enjeu commercial pour attirer et garder les clients. En effet, un avantage majeur des modes collectifs est la possibilité donnée aux passagers de disposer de leur temps de transport comme bon leur semble. Qu'il s'agisse de travail ou de divertissement, la généralisation des accès à Internet dans les avions est en cours, son installation dans les trains à l'étude. Quant à l'automobile, la prestation des services de communications de ce type est vue comme un moyen de financer l'installation des dispositifs de communications par une offre tarifée.

## Les tendances technologiques et les technologies clés

### L'allègement des véhicules

Trois principales voies sont envisagées pour réduire la consommation de carburants des véhicules. La première d'entre elles, sur laquelle portent beaucoup de travaux consiste à alléger le véhicule. Pour cela, le travail est fait sur chaque composant et sous-ensemble du véhicule. Cette tendance technologique concerne tous les modes terrestres et aériens, et doit être considérée sous contrainte de ne pas changer le comportement des véhicules (confort, dynamique, sécurité...).

L'allègement est porteur de verrous technologiques sur tous les types de matériaux :

- Les parties de moteur avec des contraintes de tenue en température,
- Les éléments de garniture et leur recyclabilité,
- L'architecture même des véhicules, qui doit permettre le désassemblage sans dégrader la sécurité...

Voir fiche :

- 68. Matériaux et technologies d'assemblage pour l'allègement.

### L'amélioration des moteurs thermiques et des carburants

Si le politique se fait le porte-parole d'une volonté d'investissement massif sur le véhicule électrique, tout le monde s'accorde pour affirmer que les gains en termes de gaz à effet de serre apportés par cette voie seront marginaux à court terme, compte

tenu des prévisions de production et de vente les plus optimistes. Le thermique, dans tous les modes, restera le mode de propulsion majoritaire dans les 20 ans à venir – voire plus. Le transport ferroviaire, très électrifié en France, demeure cependant aujourd'hui encore majoritairement avec des motrices diesel dans le monde : les ventes diesel sont cinq fois plus importantes que celles de motrices électriques au niveau mondial.

Ainsi les travaux sur les améliorations des moteurs thermiques et des turbines restent-ils de première importance pour atteindre les objectifs environnementaux que la France et l'Europe se sont donnés. Il est à noter que les moteurs thermiques se développent également, notamment dans l'automobile, sur de nouveaux types d'architectures hybrides dans lesquelles la propulsion est assurée par des moteurs électriques ; le moteur thermique (*range extender*) sert alors de génératrice pour recharger les batteries. Dans une version moins ambitieuse le moteur thermique est simplement de plus petite taille (*downsizing*) si un surcroît de puissance peut être apporté par des moteurs électriques en cas de besoin.

Voir fiches :

- 58. Moteurs à combustion interne.
- 60. Nouvelles technologies de turbomachines.

### L'électrification des véhicules

Enfin, le troisième axe pour le développement de véhicules moins polluants et émettant moins de gaz à effet de serre est l'électrification des fonctions du véhicule. Cette électrification ne touche pas les mêmes organes selon le mode de transport :

- le naval est utilisateur d'architectures hybrides depuis longtemps en associant des fonctions électriques à des génératrices diesel ;
- l'avion plus électrique, voire tout électrique (hors propulsion) est un objectif technologique majeur des constructeurs. La première étape est aujourd'hui le remplacement de commandes de vol hydrauliques par des commandes électriques. À terme, il est prévu de rendre « électriques » l'ensemble des autres fonctions (climatisation, roulage, freinage, etc.), posant des questions importantes d'architecture et de compatibilité électromagnétique. Ces considérations s'appliquent également en partie à l'hélicoptère ;
- les voitures utilisent depuis déjà longtemps l'électronique et l'électricité pour commander des fonctions ou assister ces fonctions (freinage, direction)... La tendance est maintenant à l'électrification de la propulsion à travers plusieurs voies : l'hybridation légère, qui consiste à récupérer de l'énergie au freinage ou à couper le moteur à l'arrêt avec un alternodémarreur ; l'hybridation moyenne qui apporte un surplus de puissance en cumulant des moteurs électrique et thermique ; l'hybridation lourde dans laquelle la propulsion peut être totalement électrique (hybride rechargeable notamment) ; enfin le véhicule complètement électrique. Dans chaque cas, l'architecture et les composants sont spécifiques ;
- les camions et bus : si pour les camions routiers il est impensable aujourd'hui d'imaginer une propulsion électrique complète,



l'hybridation peut venir à travers le *downsizing* des moteurs thermiques et complément de puissance électrique, ou encore par la prise en charge électrique des systèmes de confort et de maintien des marchandises (froid, chauffage de la cabine, etc.). Dans le cas des bus, ces deux dernières années ont vu naître de nombreux projets portant sur une approche nouvelle des transports en commun, avec par exemple la mise en convoi de séries de véhicules électriques indépendants. L'hybridation avec *stop-and-start* est aussi particulièrement adaptée aux profils de mission urbains et déjà des offres commerciales apparaissent ; la recherche se poursuit avec l'hybride rechargeable par bibe-ronnage en station et l'électrification complète du mode bus se profile à terme, assurant un rapprochement avec les technologies propulsives du trolleybus et du tramway ;

- les trains, déjà largement électrifiés, font l'objet de travaux sur l'architecture globale, la répartition de la propulsion, etc. Pour les tramways, de fortes demandes existent pour une amélioration de l'autonomie entre les sections alimentées pour favoriser l'esthétique des centres-villes.

Enfin il est important de noter que cette tendance technologique s'accompagne d'une remise en cause profonde des modèles économiques classiques du secteur, voire du rôle des acteurs de la filière. Notamment, l'installation et la gestion des infrastructures de recharge pour les véhicules routiers posent un certain nombre de questions de modèle de vente, qui font l'objet d'expérimentations aujourd'hui.

Enfin, à plus long terme, l'architecture des véhicules électriques est favorable à une automatisation, partielle dans un premier temps, de la conduite, soit pendant le transport de passager, soit pour une mise en convoi à des fins de regroupement d'une flotte par exemple.

Voir fiches :

- 59. Moteurs électriques.
- 63. Technologies de stockage et de gestion à bord de l'énergie électrique.
- 64. Électronique de puissance.
- 65. Mécatronique.
- 13. Robotique.

Note : Dans le domaine naval, on assiste également à une résurgence de la voile comme complément de traction pour les cargos, comme moyen de réduire les consommations de carburant.

## La surveillance en continu et l'échange de données

Pour servir un certain nombre d'enjeux exposés ci-avant, le besoin d'informations sur le fonctionnement des systèmes en temps réel ou quasi réel est de plus en plus important. Ce besoin sert notamment les dispositifs actifs de sécurité (routière, ferroviaire, aérienne, navale), embarqués ou coopératifs ; les opérations de gestion de trafic ; la télémaintenance ou la surveillance en continu (monitoring) à des fins de maintenance prédictive, etc.

Cette surveillance suscite des développements technologiques sur toutes les briques concernées des systèmes :

- les capteurs embarqués sur les véhicules ou sur l'infrastructure, ainsi que le traitement des informations, via la fusion de données, pour fournir au système une information de haut niveau directement traitable ;
- les systèmes de communications : vecteurs physiques, protocoles, adaptés à leur contexte particulier ;
- les bases de données et les modèles économiques pour le stockage, l'exploitation, la mise à disposition des données. Des questions juridiques se posent également, dans le domaine de la protection des données individuelles, du partage des données entre acteurs... ;
- les modes de diffusion des données ;
- la prise en compte des systèmes nomades existants et embarquant déjà capteurs et systèmes de transmission ;
- les systèmes d'exploitation des données pour la gestion de trafic, la maintenance, les services, le télépéage, etc.

Voir fiche :

- 66. Communications et données.

## Méthodes et processus

L'évolution des méthodes et outils de conception est porteuse de grands potentiels de changement et d'amélioration aussi bien des coûts de conception que de la fiabilité des systèmes conçus :

- co-conception ou conception collaborative entre plusieurs acteurs ;

- gestion et suivi des contraintes de conceptions et de fonctionnement des systèmes ;
  - validation des architectures *a priori* ;
  - validation et certification numérique, pour limiter les temps de validation physique des systèmes au minimum indispensable. À ce titre, la dissémination des méthodes d'optimisation de l'ingénierie apparaît comme un objectif important de nombre d'acteurs de l'accompagnement des filières (pôles de compétitivité, chambres consulaires, associations professionnelles...).
- Enfin, plus aucun système n'est mis au point sans prendre en compte le rôle et le comportement de l'humain, qu'il soit opérateur, conducteur ou passager. Cette tendance lourde a des implications à plusieurs niveaux, notamment dans la conception des interfaces (qui fait appel à une compréhension fine des interactions), mais également dans l'interaction avec les objets de l'humain : téléphone mobile, systèmes de données...

Voir fiches :

- 61. Interaction homme-machine, ergonomie.
- 67. Démarches d'optimisation de l'ingénierie et de la production.
- 69. Outils et méthode de conception et de validation.

## Optimisation des chaînes de transport

Considérer les chaînes de transport dans leur ensemble est devenu un impératif, pour optimiser tant les transports de marchandises (coût financier) que les transports de personnes (coût social). Ainsi, la chaîne de transport considérée de plus en plus par les différents acteurs de la filière est observée de son point de départ à son point d'arrivée. Un certain nombre de voies technologiques sont objets de développement :

- les systèmes d'optimisation logistiques, qui font appel à des outils mathématiques puissants pour résoudre des problèmes d'optimisation de chargement, de trajet, en fonction de contraintes multiples de coût, de ressources, etc. ;
- les systèmes d'information multimodale pour le transport de passagers...

Voir fiche :

- 67. Démarches d'optimisation de l'ingénierie et de la production.

## Analyse de la position de la France

La France possède une industrie et des opérateurs de premier plan dans les différents domaines du transport : véhicules terrestres ou aérien, domaine spatial, navires, logistique. Dans l'ensemble de ces domaines, la France figure dans le peloton de tête au niveau européen, voire mondial. Cependant, on observe selon les secteurs des différences notables de positionnement par rapport aux partenaires européens.

Dans l'industrie des transports, les acteurs français industriels couvrent l'ensemble des champs technologiques adressés dans

ce document, avec toutefois une expertise plus prononcée sur les systèmes et l'intégration que sur la fabrication et la conception de composants.

Pour les activités de service également, la France dispose de leaders mondiaux sur les différents secteurs du transport de passagers (RATP, SNCF, Veolia Transports, Air France-KLM...) comme du fret (SNCF Geodis, Air France-KLM, Chronopost, Norbert Dentressangle...). Certaines des infrastructures de transport les plus importantes en Europe sont françaises : la gare du Nord à Paris pour le transport ferré de voyageurs, le port du Havre, l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle...

Le classement des 1 000 entreprises européennes qui investissent le plus en R&D (en valeur absolue) [5.7] permet de mettre en évidence quelques faits saillants. Ils ne prétendent pas à l'exhaustivité des dépenses du secteur, mais mettent en évidence la forte position des entreprises françaises en termes de participation à la R&D privée européenne.

Dans le secteur automobile, si la France fait partie des quelques pays européens à avoir des constructeurs nationaux puissants, la dépense de R&D des principales entreprises reste très inférieure à son équivalent allemand avec 6,0 Mds€ en 2009 contre 21,8 Mds€ en Allemagne.

Sur les véhicules routiers, la position de la France, à travers les activités française du groupe Volvo et des équipementiers spécialisés, est dans le peloton de tête des dépenses privées de R&D. Le groupe Volvo fait formellement de la Suède le premier pays européen en termes de R&D des grands groupes dans le domaine des transports routiers, devant l'Allemagne. Ce positionnement de la Suède est cependant en partie dû à la consolidation des chiffres de Renault Trucks dans ceux du groupe Volvo. Ainsi, la R&D des industriels français des véhicules de transport routier de marchandises et de passagers est estimé par le pôle de compétitivité LUTB à 250 M€ annuels.

Dans l'aéronautique, la France est un des premiers pays en termes d'investissement de ses entreprises dans la R&D avec un investissement de l'ordre de 1,6 Md€, ne comprenant pas l'investissement d'EADS, société immatriculée aux Pays-Bas. Ce dernier pays se voit donc crédité d'une dépense de R&D privée de ses grands groupes de 2,7 Mds€ dans l'aéronautique et le spatial.

Enfin, la France est le deuxième pays européen à investir dans la R&D sur les services de transport et de logistique, derrière l'Allemagne, avec respectivement des investissements de 106 et 156 M€ pour les principaux groupes industriels.

Dans ce paysage français, le rôle des pôles de compétitivité sur les transports apparaît comme structurant, y compris au niveau international. Les pôles concernés au premier chef par la thématique transports (Mov'eo, i-Trans, System@tic-Paris région, Lyon Urban Truck & Bus, Véhicule du futur, Aerospace Valley, Astech, Novalog, Id4car...) regroupent les principaux acteurs industriels et des services, ainsi que les PME innovantes qui sont de plus en plus parties prenantes de leurs actions. En ce qui concerne le positionnement de la France, les pôles mettent en général en place des actions de coopération ou de représentation internationale avec des clusters comparables à l'étranger.

## Recommandations

Au regard des enjeux auxquels l'industrie des transports fait face, quelques recommandations générales ressortent de l'analyse et de la consultation des experts.

La première recommandation vise à maintenir la dynamique de la croissance et du maintien de l'activité industrielle à travers le soutien à la recherche et à l'innovation. Les mécanismes existants sont jugés utiles et importants, tant pour le soutien à l'activité que pour l'attractivité de la France ; ces mesures sont des facteurs clés pour l'implantation en France d'industriels étrangers :

- crédit d'impôt recherche, y compris et surtout dans sa dernière configuration ;
- financements Oséo, Fui, ANR, etc. pour les projets de recherche collaborative, le financement des développements, le recrutement de docteurs... L'ouverture des appels à projets à des thématiques plus transversales ou organisationnelles permettrait de plus grandes avancées dans le recueil de données et le développement de technologies « molles ». Il est souligné par les acteurs que ces thématiques ne sont pas portées par les instances de labellisation des pôles de compétitivité ;
- l'innovation à partir des usages constitue une tendance lourde pour une bonne adéquation des innovations aux attentes et aux contraintes du marché (ergonomie, modèle économique, acceptabilité sociale...). Comme cela a été initié depuis 2007 et le 7<sup>e</sup> PCRDT européen, le soutien aux expérimentations en vraie grandeur (*Field Operational Test* ou FOT) est un élément important dans les programmes de recherche ;
- enfin, des échelles de temps plus courtes que les projets à trois ans seraient de nature à favoriser des collaborations à finalité très applicative.

Une deuxième recommandation est en lien direct avec un des enjeux génériques : la standardisation ou normalisation. Toute action visant à informer sur la normalisation ou standardisation comme arme économique offensive et stratégique est de nature à renforcer la participation de l'industrie française dans son ensemble à des démarches groupées pour imposer sur les marchés ses choix technologiques. La prise en compte insuffisante de cette dimension par les constructeurs et équipementiers français constitue une faiblesse face à des industries nationales fortement mobilisées (Chine, Japon, États-Unis...).

Pour le soutien à l'activité inventive, la question de la simplification du brevet européen reste un enjeu pour la protection industrielle.

Au niveau de la formation proprement dite, plusieurs remarques peuvent être formulées :

- un manque d'attractivité, bien connu, des métiers techniques ;
- une culture de la production, à renouveler y compris dans les écoles d'ingénieurs. L'accent est fortement mis sur la recherche et l'innovation, alors que la production est aussi une activité clé pour l'industrie ;
- un défaut également de culture technique pratique de la formation des ingénieurs : notamment, la réalisation et la mise en

œuvre effective des travaux de conception restent un point faible de la formation pour une bonne prise en compte des aspects concrets de l'activité. Par exemple, la fabrication d'un composant mécanique permet d'appréhender plus finement des aspects qui sont trop abstraits lors de leur conception numérique. À l'autre extrémité de la chaîne, un défaut de formation sur la conception de fonctions complètes apparaît dans les formations.

Enfin, il est aujourd'hui admis que, selon les filières, les grands groupes industriels ne considèrent pas comme faisant partie de leurs missions de tirer un écosystème de sous-traitants établis ou nouvellement créés vers plus de compétences et vers de nouveaux marchés. Les États généraux de l'industrie ont permis une prise de conscience, accompagnée de chartes de bonnes pratiques pour les achats signés en 2010, dont la mise en œuvre nécessite un suivi vigilant.



## 58. Moteurs à combustion interne

### Description

Malgré une tendance à l'électrification des moteurs et des véhicules, les moteurs à combustion interne alimentés par carburants hydrocarbonés, en l'occurrence les moteurs à pistons, restent clés pour le secteur des transports pour plusieurs raisons : ces technologies bénéficient encore d'un potentiel d'amélioration non négligeable ; elles seront encore utilisées plusieurs décennies pendant la transition probable vers le tout électrique ; et enfin leur amélioration vise à répondre au contexte normatif de plus en plus restrictif par la réduction des consommations et la limitation des émissions.

Les innovations technologiques en cours de développement ou à venir concernent de nombreux organes du moteur, du système d'alimentation jusqu'à la ligne d'échappement.

De nombreux travaux sont menés sur l'amélioration de la combustion dans les cylindres notamment par l'amélioration des systèmes d'injection aujourd'hui modélisés et optimisés par simulation numérique : systèmes hautes pressions, nouvelles géométries d'injecteurs, buses à débit variable pilotées par actuateur piézoélectrique...

Et plus spécifiquement :

- pour les moteurs diesels : le HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*) et le LTC (*Low Temperature Combustion*) ;
- pour les moteurs à essence : la combustion en mélange stratifié et la combustion par auto inflammation (CAI) ; La réduction de la cylindrée et l'éco-suralimentation (ou *downsizing*) sont aussi des axes de travail majeurs des ingénieurs motoristes, ces techniques consistent à diminuer la taille du moteur, et donc la consommation tout en conservant les performances ;
- suralimentations par turbo, en utilisant par exemple des turbos électriques à bas régime ;
- cylindrée et taux de compression variables (VCR) tel que le moteur développé par MCE-5 en France ;
- désactivation de cylindre qui consiste à déconnecter purement et simplement un ou plusieurs cylindres à bas régime pour les réactiver lors des besoins de puissance.

Au-delà de ces aspects injection et réduction de cylindrée, plusieurs autres pistes d'amélioration sont explorées :

- optimisation des systèmes mécaniques et réduction des frictions : lubrification avancée, réduction des surfaces de frottement et traitements de surface adaptés ;
- matériaux pour l'amélioration de la gestion thermique, avec par exemple pour objectif la réduction du temps de montée en température ;
- capteurs et actionneurs intégrés issus des progrès de la mécatronique et permettant le pilotage toujours plus

fin du moteur par un calculateur.

Parallèlement à l'optimisation du moteur à proprement parler, des recherches sont effectuées sur la dépollution de la chaîne de traction thermique :

- nouvelles générations de filtres, catalyseurs et reformeurs notamment pour traiter le problème des émissions à froid, technologie SCR (*Selective Catalytic Reduction*) qui utilise une adjonction d'urée pour limiter les rejets de NOx ;
- systèmes de pilotage de la chaîne de dépollution, augmentation du nombre de capteurs, amélioration du procédé de recyclage des gaz d'échappements (EGR basse pression).

La durabilité des systèmes anti-pollution est notamment un enjeu important (problématiques de nettoyage et de régénération des filtres et catalyseurs).

Enfin il est à noter que ces évolutions se font en parallèle de l'avènement de nouveaux carburants : carburants issus de la biomasse ou carburants de synthèse nécessitent des adaptations à différents niveaux : injection, filtres, catalyseurs...

### Applications

Le premier marché des moteurs à pistons concerne le transport routier. L'objectif est d'améliorer les motorisations actuelles mais aussi d'accompagner la commercialisation des véhicules hybrides. Les constructeurs automobiles se sont lancés depuis plusieurs années dans une course pour améliorer les performances énergétiques de leurs moteurs.

Les poids lourds dont l'électrification totale à moyen terme est peu probable sont aussi concernés par les progrès des moteurs thermiques.

Le secteur aéronautique n'est pas en reste puisque l'aviation légère et depuis peu l'industrie de l'hélicoptère sont intéressées par ces technologies. Eurocopter travaille aujourd'hui sur des moteurs à pistons fonctionnant au diesel ou au kérosène pour ses hélicoptères légers.

Les secteurs du ferroviaire et du naval utilisent des moteurs diesels pour la production d'électricité dans des systèmes hybrides. Les puissances mises en jeu étant bien supérieures à celles rencontrées dans le domaine des transports terrestres, ces applications constituent des marchés de niche ne répondant pas aux mêmes critères de conception et de limitation d'émissions, et qui sont ainsi moins étudiés.

### Enjeux et impacts

Portées par de grands groupes industriels, notamment les constructeurs automobiles, le moteur à combustion interne est une technologie d'avenir. En 2007, les carburants dérivés du pétrole utilisés dans ce type de moteur

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

couvraient 97 % de l'énergie utilisée dans les transports routiers à l'échelle mondiale [5.46].

Des progrès conséquents sont encore possibles concernant l'amélioration de cette technologie selon un double objectif : la diminution des consommations et des rejets de CO<sub>2</sub> à travers l'amélioration du rendement énergétique et la diminution des émissions de polluants, tout en adaptant les moteurs aux carburants à moindre impact CO<sub>2</sub>, notamment pour répondre aux normes européennes Euro5 en 2009-2010 et Euro6 en 2013-2015.

L'optimisation des moteurs répond aussi à un enjeu économique lié à l'augmentation du coût du pétrole.

Enfin, un enjeu est présent sur les émissions sonores des véhicules.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

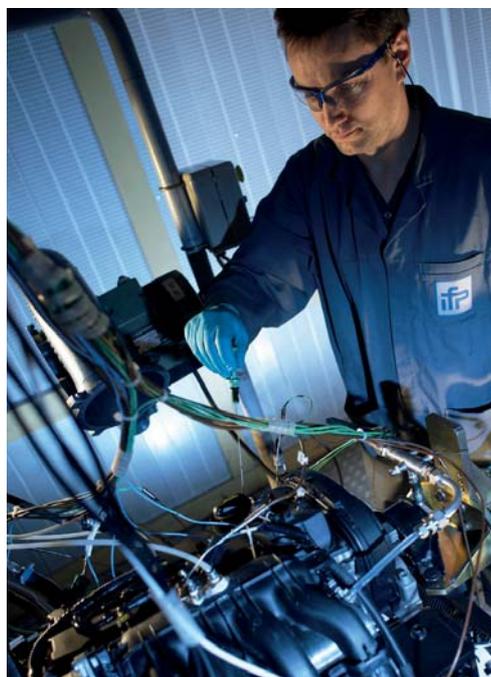
- **Recherche** : IFP Energies Nouvelles ; Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA) – Université de Rouen, CNRS ; Centre de Recherche, d'Innovation Technique et Technologique en Moteurs et Acoustique Automobile (Critt M2A) ; Laboratoire d'Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion (EM2C) – CNRS Ecole Centrale Paris ; Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs (LCRS) – CNRS ; Centre d'Etude et de Recherche Technologique en Aérothermique et Moteurs (Certam) ; Laboratoire de Combustion et de Détonique (LCD) – Ensm Poitiers, CNRS ; Laboratoire Transport et Environnement – Inrets

- **Pôles de compétitivité** : Mov'eo, LUTB2015, ID4Car, Véhicule du Futur, pôle Céramique

- **Constructeurs, intégrateurs et équipementiers** : Renault, PSA Peugeot-Citroën, Eurocopter, Renault Truck, Faurecia, Valeo, Johnson Controls, Delphi, Bosch France, MCE-5 Development

## Position de la France

La France est bien positionnée pour ce qui est des transports terrestres, avec notamment des constructeurs automobiles qui se sont intéressés très tôt aux problématiques d'optimisation des moteurs à combustion interne, et qui disposent aujourd'hui de technologies de moteur au rapport performance/émissions parmi les meilleurs du marché, particulièrement pour ce qui est des motorisations diesel.



## Analyse AFOM

### Atouts

Force industrielle (constructeurs automobiles français), expertise dans le domaine de l'amélioration de l'efficacité énergétique des motorisations, notamment diesel.

### Faiblesses

Concurrence interne pouvant disperser les efforts.

### Opportunités

Renouvellement des gammes lié aux nouvelles normes d'émissions, accompagnement du déploiement des véhicules hybride, regain d'intérêt pour les petites motorisations.

### Menaces

Relâchement des investissements au profit du véhicule électrique, décroissance du marché envisagée à très long terme.

## Recommandations

L'effort de soutien envers les motorisations thermiques doit être maintenu malgré l'étude de modes de propulsion alternatifs. Les outils existants pour le soutien de la filière moteur en France doivent être pérennisés. Par ailleurs, les acteurs gagneraient à travailler ensemble le plus tôt possible pour dégager des synergies.

Enfin et de façon plus concrète, il y a un enjeu intéressant sur le développement de petits moteurs (mono, bi ou tri cylindres) fonctionnant en régime stabilisé pour des applications de prolongateur d'autonomie sur véhicules électriques.

### Liens avec d'autres technologies clés

41

56

65

68

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 59. Moteurs électriques

### Description

Cette fiche concerne les machines électriques de moyenne et forte puissance dédiées à la motorisation dans le secteur des transports.

Les machines électriques sont des convertisseurs d'énergie électrique en énergie mécanique (moteur) et inversement (générateur). Dans le domaine des transports, les machines électriques sont usuellement appelées moteurs électriques, étant le plus souvent utilisées en configuration moteur.

Trois grandes familles de moteur existent aujourd'hui pour des applications de fortes puissances :

- les moteurs synchrones, après avoir été supplantés par les moteurs asynchrones, reviennent sur le devant de la scène notamment dans le domaine des transports routiers, moteurs synchrones à aimants permanents ou moteurs sans balais (*brushless*) ;
- les moteurs asynchrones, aujourd'hui les plus répandus pour leur meilleur rapport qualité/prix ;
- les moteurs à courant continu peu utilisés aujourd'hui pour la motorisation dans les transports.

Les évolutions portent notamment sur l'utilisation d'aimants permanents (alliages néodyme-fer-bore) et de nouvelles géométries (passage d'un flux radial à un flux axial). Par ailleurs la compacité et l'allègement sont améliorés par l'usage de nouveaux matériaux pour le carter, tout en maintenant la résistance aux contraintes mécaniques et thermiques liées aux hautes vitesses de rotation.

Mais les progrès sont surtout attendus sur l'amélioration de ses capacités d'intégration et sur les éléments annexes qui en sont indissociables :

- intégration et amélioration des fonctions d'électronique de puissance telles que l'onduleur qui permet de piloter les moteurs, mais aussi des fonctions permettant une utilisation en générateur pour recharger la batterie lors des phases de freinage ;
- réducteurs et boîtes de vitesse mécaniques ou électroniques adaptés aux spécificités des moteurs électriques ;
- fonctions de monitoring intégrées (température, vibrations, intensité des courants... ) ;
- gestion thermique et amélioration des systèmes de refroidissement par air ou par eau.

De nombreux travaux sont notamment réalisés sur le moteur-roue qui, en plus de réduire l'encombrement, permet de limiter au maximum les pertes induites par les couplages mécaniques (la transmission d'énergie est électrique, avec un excellent rendement).

VÉHICULE ÉLECTRIQUE : LES ORGANES SPÉCIFIQUES  
ELECTRIC VEHICLE: CHARACTERISTIC COMPONENTS



### Applications

Pour le secteur des transports terrestres, l'optimisation du groupe motopropulseur électrique reste aujourd'hui un enjeu important car conditionnant l'ensemble de l'architecture des véhicules électriques ou hybrides.

Des travaux sont en cours sur les moteurs-roue électriques tel que l'Active Wheel de Michelin. Des véhicules à des stades plus ou moins avancés (voitures et bus) sont déjà équipés par ces solutions.

Pour ces applications, les puissances des moteurs utilisées sont de l'ordre de 20 à 60 kW et devraient augmenter avec l'avènement de batteries plus puissantes.

On pourra aussi citer l'importance de cette technologie pour le développement des alternodémarrateurs qui est un premier pas vers l'hybridation et l'électrification des véhicules en élevant la tension du réseau de bord et en permettant la fonction *stop-and-start* (extinction automatique du moteur thermique lorsque le véhicule est à l'arrêt).

Dans le secteur ferroviaire, le gain en compacité des moteurs a permis la répartition de la propulsion sur plusieurs bogies du train, supprimant la locomotive et optimisant le nombre de voyageurs par surface occupée dans le futur AGV (automotrice grande vitesse).

Des projets de recherche sont en cours pour la motorisation du train d'atterrissage des avions de ligne par l'utilisation de moteurs roue électriques (démonstrateur Trame du Corac, le Conseil pour la recherche aéronautique civile). En plus de limiter la consommation de kérosène au sol, cela permettrait de rendre les avions autonomes pour les phases de « taxiage ». L'aviation légère commence à s'intéresser aux moteurs électriques pour la propulsion.

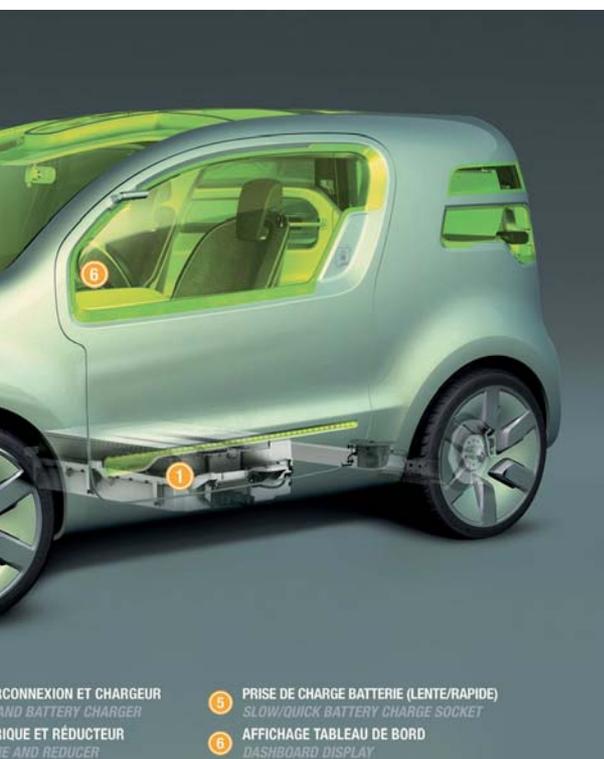
Enfin, les moteurs électriques de fortes puissances équipent déjà depuis un certain temps le secteur naval. Les grands navires sont en effet propulsés par des systèmes hybrides diesel-électriques. Les moteurs électriques sont de plus en plus intégrés dans des pods, nacelles orienta-

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



1. PRISE DE CHARGE BATTERIE (LENTE/RAPIDE)  
SLOW/QUICK BATTERY CHARGE SOCKET  
2. AFFICHAGE TABLEAU DE BORD  
DASHBOARD DISPLAY  
3. CONNEXION ET CHARGEUR  
AND BATTERY CHARGER  
4. MOTEUR ET RÉDUCTEUR  
MOTOR AND REDUCER

bles dotées d'une ou plusieurs hélices et disposées sous la coque, ces dispositifs assurant à la fois la propulsion et l'orientation du navire.

Les machines électriques sont par ailleurs utilisées dans le domaine de l'énergie et dans l'industrie pour de nombreuses applications.

## Enjeux et impacts

Les moteurs électriques sont jugés comme étant un composant d'avenir pour la filière des transports de par les enjeux économiques qu'ils représentent. Ils constituent un composant essentiel de la tendance à l'électrification ; leur intégration est de plus en plus poussée grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la mécatronique.

Le Plan national véhicules électriques annoncé en octobre 2009 prévoit un parc de 2 millions de véhicules hybrides rechargeables ou électriques en 2020, puis 4,5 millions en 2025 en France.

L'avenir du moteur électrique est probablement lié à son intégration au plus près des éléments propulseurs (roues, bogies, pods) pour favoriser le gain de place et assurer des rendements de fonctionnement optimaux.

## Acteurs

- **Recherche** : IFP Energies Nouvelles ; Laboratoire de Génie Électrique de Paris (LGEPE) – Supélec, CNRS ; Laboratoire d'Électromécanique de l'Université de Technologie de Compiègne (LEC) – UTC ; INRETS Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN).
- **Pôles de compétitivité** : Véhicule du Futur, Mov'eo, Astech, i-Trans
- **Industriels** : Alstom, Michelin, Valeo, EDF, Renault, PSA Peugeot Citroën, Renault Truck, SNCF, Heuliez, Leroy Somer, Messier-Bugatti, Continental, ERNEO, Phoenix International, Bolloré, Lumeneo, Venturi

## Position de la France

La France, notamment à travers Alstom, est en bonne position concernant les moteurs électriques de fortes puissances pour des applications lourdes. Ce dernier conçoit notamment des chaînes de traction électriques pour des bus, des tramways ou des trains.

Pour ce qui est des moteurs de puissances moyennes dédiés au secteur automobile, la France compte quelques PME innovantes travaillant sur les véhicules électriques, mais les industriels allemands et japonais sont avancés.

Les constructeurs cherchent aujourd'hui à intégrer la technologie pour conserver la production des éléments clés du groupe motopropulseur électrique.

## Analyse AFOM

### Atouts

Compétences présentes chez certains grands industriels français (Alstom, EDF) pour les machines de forte puissance.

### Faiblesses

Expertise plus limitée pour les puissances moyennes dédiées à la propulsion automobile.

### Opportunités

Appropriation de la technologie par les constructeurs pour soutenir le marché des véhicules hybrides et électriques.

### Menaces

Technologie de base de conception sommaire pouvant être produite dans les pays à bas coûts. À cela on peut ajouter le risque d'une bataille « d'appropriation » de la technologie dans la chaîne de la valeur qui pourrait disperser les efforts.

## Recommandations

Les grands acteurs du domaine devraient être associés pour éviter la dispersion des efforts. Il pourrait à ce titre être intéressant d'étudier l'apport des acteurs des grandes puissances à la filière automobile.

Un soutien de la filière française dans ce domaine passe aussi par un soutien aux quelques PME/PMI françaises travaillant sur les véhicules électriques.

## Liens avec d'autres technologies clés

63

64

65

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 60. Nouvelles technologies de turbomachine



complexité, et plusieurs pistes d'amélioration sont étudiées, ces dernières concernent aussi bien le moteur que sa nacelle (son carénage) :

- allégement, particulièrement important pour le secteur aérien, réalisé notamment par l'utilisation de nouveaux matériaux : matériaux composites à matrice organique ou métallique, superalliages (dont l'aluminium de titane), matériaux céramiques. Ces nouveaux matériaux sont étudiés pour résister à des contraintes aussi bien mécaniques que thermiques extrêmes ;
- aérodynamisme : optimisation des écoulements rendue possible par la simulation numérique, nouvelles formes d'aube tirant partie des nouveaux matériaux composites, augmentation du taux de dilution, utilisation de turbines contra-rotatives ;
- optimisation énergétique, réduction de la taille de la chambre de combustion ;
- réduction du bruit notamment à travers l'optimisation de l'aérodynamisme et l'emploi de structures et matériaux spéciaux ;
- expérimentation sur de nouveaux carburants dérivés de biomasse ou de synthèse ;
- résistance et fiabilité, diminution du nombre d'opérations de maintenance.

L'avènement de configurations en soufflante non-carénée (ou « open rotor ») pourrait être envisagé au-delà de 2020. Ces dernières devraient permettre d'améliorer les rendements, mêmes si des verrous subsistent concernant le niveau des émissions sonores et les problèmes de sécurité.

Par ailleurs, les efforts concernant ces systèmes sont accompagnés par l'étude de nouveaux carburants de synthèse et carburants issus de la biomasse. À court terme, ces nouveaux carburants devraient être adjoints à faible dose au kérosène, de façon à limiter les modifications requises sur les turbomachines. À plus longue échéance (dix ans), des réacteurs fonctionnant aux biocarburants sont envisagés. Les projets européens Alfa-Bird, Swafea ou le programme national Calin s'intéressent à ces problématiques.

### Applications

Les turbomachines incluent trois familles de moteur, chacune dédiée à un type d'aéronef :

- les turboréacteurs des avions de ligne (Boeing, Airbus) et des avions militaires (Rafale). À titre d'exemple le nouveau moteur Leap X développé conjointement par Snecma et GE sera disponible à partir de 2016 et devrait permettre d'atteindre des consommations de 16 % inférieures à celles des meilleurs turboréacteurs actuels. Le Corac (Conseil pour la recherche en aéronautique civile) a lancé un pro-

### Description

Les turbomachines constituent une famille de systèmes de propulsion dédiés au secteur aéronautique. Elles fonctionnent selon le principe d'accélération d'un flux d'air, soit directement utilisé en propulsion, soit récupéré sous forme mécanique pour l'entraînement d'une hélice ou d'un rotor. Cette accélération est obtenue par combustion d'un carburant dans l'air, la détente des gaz ayant lieu dans une turbine qui peut ainsi récupérer l'énergie produite.

Pour les turboréacteurs, la propulsion est assurée d'une part par l'éjection des gaz d'échappement à l'arrière du réacteur, et d'autre part par la soufflante qui agit comme une hélice en entrée du réacteur (réacteur double ou triple flux).

Pour les turbopropulseurs et les turbomachines, l'énergie mécanique produite par la turbine est récupérée pour faire tourner une hélice ou un rotor.

Ainsi les turbomachines sont des dispositifs d'une grande

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

gramme de démonstrateur sur les systèmes propulsifs à fort taux de dilution ;

- les turbopropulseurs utilisés pour l'aviation commerciale régionale (ATR) ou pour l'aviation militaire (A400M) ;
- les turbomoteurs utilisés pour les hélicoptères. Des travaux initiés par Eurocopter et Safran Turbomeca portent notamment sur les turbomoteurs forte puissance (gain de consommation, gains environnementaux, amélioration du rapport puissance/masse).

À noter que les technologies de turbomachines sont très proches des turbines utilisées dans le domaine de l'énergie et certains motoristes ont développés des gammes de turbines dédiées à ce marché.

## Enjeux et impacts

Les enjeux concernent essentiellement la réduction des émissions polluantes et des gaz à effet de serre. Ainsi, les objectifs fixés par l'Acare (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) pour 2020 imposent au transport aérien de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 50 %, de NOx de 80 %. Ces objectifs sont pour beaucoup tributaires de l'amélioration des performances énergétiques des turboréacteurs couplée à l'avènement de nouveaux carburants à faible impact en termes de rejets.

Un des autres enjeux concerne la limitation des nuisances sonores. À nouveau, l'Acare fixe des objectifs ambitieux pour 2020 avec une réduction du bruit perçu de moitié par rapport aux niveaux d'aujourd'hui.

L'enjeu économique est de taille puisque l'industrie des turbomachines et plus généralement l'industrie aéronautique est particulièrement développée en France, 80 % de son chiffre d'affaires est réalisé à l'export. Les vingt prochaines années, ce ne sont pas moins de 30 000 avions de ligne qui devraient être mis en service dans le monde [5.36].

## Acteurs

- **Recherche** : Onera ; Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (Isae) ; Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (LMFA) – Ecole centrale de Lyon ; Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie (Coria) – Université de Rouen, CNRS...
- **Pôles de compétitivité et réseaux** : Aerospace Valley, Astech, Gifas, Corac (Conseil pour la recherche en aéronautique civile)
- **Industriels français** : Safran Snecma (notamment à travers la joint venture CFM International créée avec General Electric), Safran Turbomeca, Safran Aircelle, Airbus, Dassault Aviation, Eurocopter

## Position de la France

La France dispose d'acteurs majeurs dans le domaine de l'aéronautique, et notamment pour ce qui est des turbomachines à travers Safran et ses différentes filiales. Les activités de Safran en font d'ailleurs le quatrième motoriste mondial, derrière General Electric, Rolls-Royce et Pratt & Whitney. Il est à noter que la collaboration entre Snecma et General Electric est un exemple réussi de coopération industrielle entre la France et les États-Unis. Suite au succès du CFM56 l'alliance CFM International a été reconduite jusqu'en 2040 et s'attache désormais à développer le Leap-X.

Le monde académique et la recherche sont aussi bien développés : l'Onera et les nombreux laboratoires en mécanique des fluides et énergétiques contribuent largement au développement des turbomachines pour l'industrie aéronautique européenne.

## Analyse AFOM

### Atouts

Safran Snecma est un challengeur sur le marché mondial (moteurs d'avions), Safran Turboméca un leader (moteurs d'hélicoptères).

### Faiblesses

Offre peu développée pour les turboréacteurs de faibles puissances, autonomie réduite liée aux coopérations internationales.

### Opportunités

Renouvellement des avions vers des gammes plus sobres et respectueuses de l'environnement.

### Menaces

Concurrence mondiale sévère, marché de l'aéronautique mondial lié aux taux de change.

## Recommandations

La principale recommandation concerne le soutien financier pour le développement des grands programmes de démonstrateurs afin de permettre ainsi aux acteurs français de continuer la course dans le peloton de tête. L'étude des carburants alternatifs doit être renforcée dans le développement de la filière.

## Liens avec d'autres technologies clés

41

56

65

68

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



# 61. Interaction homme-machine, ergonomie

## Description

L'interaction homme-machine constitue, sinon une technologie, un savoir et un savoir-faire nécessaires à la mise en œuvre des aides à la conduite dans le domaine automobile, des assistances au pilotage en avionique et dans le domaine naval, du poste de conduite des trains et transports guidés, des systèmes d'aide aux chauffeurs routiers, et enfin à une meilleure supervision des systèmes (salles de contrôle, logistique). La question du rôle de l'humain dans la décision est centrale dans la conception des interfaces, et la compréhension de l'interaction entre opérateur et « machine » est un maillon important de la conception des systèmes, la composante humaine étant alors partie prenante du système. La limitation de la charge sensorielle, du stress des opérateurs est une qualité primordiale dans la conception des systèmes complexes ou critiques.

Ces savoir-faire sont fortement liés à une meilleure connaissance du comportement de l'opérateur sur la base de travaux académiques notamment.

D'un point de vue purement technique, de nouvelles technologies, ou du moins leur diffusion plus large, servent ces ambitions en termes d'interaction. Par exemple :

- interfaces tactiles (écrans, surfaces, etc.) dont l'usage est largement démocratisé par les téléphones mobiles ;
- interaction vidéo par reconnaissance de gestes, analyse de visages, d'attitudes, etc. ;
- interaction vocale ;
- retour d'information haptique, sonore ou visuel ;
- affichage tête haute.

La place des appareils nomades comme interface disponible entre un opérateur ou un usager et le système de transport est ici pleinement posée.

Les questions d'acceptabilité sociale et juridique des interfaces et des fonctions qu'elles sous-tendent sont également posées dans ce cadre. Elles conditionnent directement la capacité d'un produit ou service à remplir sa fonction de manière efficace.

## Applications

Non spécifique au transport, cette technologie ou méthodologie est critique pour des domaines aussi différents que le pilotage d'un réseau d'énergie ou de transport (enjeu d'efficacité ou de sécurité) et l'interaction sur ordi- phone (enjeu commercial). De manière non exhaustive, les applications peuvent être :

- aides à la conduite pour les usagers automobiles (particuliers) ou les professionnels (camion, bus, train, tram...) ;
- pilotage non intrusif des systèmes de confort à bord des véhicules (téléphone mobile, navigation, systèmes multimédia...) ;

- poste de conduite des navires ;
- poste de pilotage des avions ;
- salles de contrôle des systèmes de transport : opérateurs routiers, logisticiens, opérateurs de transports en commun, contrôle aérien ou maritime...

Le marché de l'interaction homme-machine, fondée en grande partie sur le service à mi-chemin entre design et ingénierie, est difficile à chiffrer.

## Enjeux et impacts

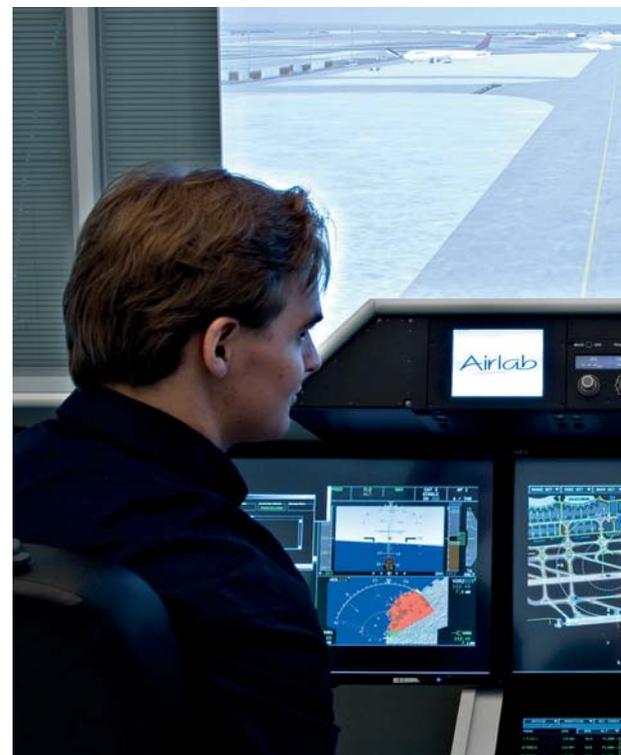
La question du rôle de l'humain dans la décision est centrale dans la conception des interfaces. Ces connaissances sont diffusantes. Le besoin se fera sentir de plus en plus, tant la qualité de l'interaction est déterminante pour l'acceptabilité d'un dispositif par les utilisateurs. Aujourd'hui, la maîtrise et la compréhension de cette interaction sont considérées comme des facteurs différenciants d'une offre industrielle, voire un prérequis indispensable de la mise au point des systèmes.

En ce sens, il est difficile de circonscrire un marché pour cette technologie tant elle est diffusante. Ses impacts sont par contre immédiatement perceptibles sur la sûreté de fonctionnement des systèmes complexes (les secteurs hautement critiques du nucléaire, de la défense ou de l'aéronautique font figure de précurseurs en la matière).

La sécurité routière, et des transports en général, passe également par ces contraintes.

D'une manière générale, les effets de la bonne conception des interfaces se traduiront dans :

- la productivité sur les systèmes concernés ;
- la consommation énergétique potentiellement (travail sur l'éco-conduite par exemple) ;



### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

- la fiabilité des produits et des *process* ;
- les conditions de travail et leurs conséquences sur la santé des opérateurs...

On se doit de souligner que la bonne définition de l'interaction et des interfaces est un vecteur d'image fort pour l'entreprise.

## Acteurs

Deux types d'acteurs se rencontrent sur ces questions, dans un dialogue indispensable pour maîtriser les tenants et aboutissants. Les industriels intègrent des compétences de conception, d'ergonomie, en interaction avec les laboratoires académiques pour la compréhension des processus (ergonomie, psychologie, sociologie, etc.). Le développement technologique est également pris en compte, au service de l'interaction. Par nature, cette thématique est fortement interdisciplinaire et inter filières.

• **Tous systémiers et équipementiers :** Thales, Areva, EDF, EADS, Airbus, Renault, PSA Peugeot-Citroën, DCNS, Alstom, STX, SNCF, RATP, Renault Trucks, Valeo, Continental...

• **Sociétés spécialisés dans la conception des interfaces et fabricants d'interfaces :**

• **Laboratoires :** Inrets, Lamih, IRCCyN, École nationale supérieure de cognitive de Bordeaux, Université de Strasbourg, Inria

• **Plateformes des pôles de compétitivité :** System@tic, Mov'eo, Nov@log...

## Position de la France

La France, à travers son industrie des grands systèmes critiques, occupe une position forte sur cette thématique. Cependant, force est de constater que la diffusion des compétences est aujourd'hui faible dans l'ensemble des filières industrielles.

## Analyse AFOM

### Atouts

Présence de compétences fortes chez les grands systémiers.

Existence d'un écosystème académique sur la question.

### Faiblesses

Faible diffusion de la compétence et de la connaissance.

### Opportunités

Prise en compte croissante de la qualité de l'interaction dans l'acte d'achat.

## Recommandations

La clé du développement de ces technologies réside dans l'acquisition de connaissances et l'intégration de disciplines telles que la psychologie cognitive, par les industriels. À ce titre, il est recommandé de travailler en profondeur sur les usages à travers la mise en place de laboratoires des usages (*living labs*). Les conditions d'accès à ces laboratoires doivent permettre à l'ensemble des filières de développer des compétences et des connaissances pour une meilleure adaptation de leurs produits et services à l'usage qui en est fait, tant par les consommateurs que dans un milieu professionnel.

Par ailleurs, la diffusion des compétences, ou à tout le moins d'un certain niveau de connaissance, est à organiser au sein des filières ou des regroupements d'entreprises.

## Liens avec d'autres technologies clés

17

18

66



### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 62. Optimisation de la chaîne logistique

### Description

L'optimisation de la chaîne logistique concerne des technologies logicielles et matérielles, notamment liées aux systèmes d'information et à la communication.

L'objectif est d'optimiser tous les composants de la chaîne logistique, en partant du fournisseur de matière première jusqu'au client final, par une meilleure coordination des différents processus à mettre en œuvre : achats et approvisionnement, production, gestion des stocks, distribution, service client..., qu'ils soient séquentiels, simultanés ou indépendants.

Ces technologies comprennent aussi bien l'optimisation de la charge d'un camion que la réduction des temps morts lors des ruptures de charge :

- systèmes de chargement et outils de manutention tels que les transpalettes et gerbeurs ;
- organisation des entrepôts et automatisation des *process*, dont l'intégration des utilisateurs finaux et les impacts sociaux économiques qui en découlent ;
- architecture des véhicules (barges modulaires, wagons autotractés, véhicules urbains propres et silencieux...);
- outils de traçabilité : marqueurs et capteurs pour la réalisation d'un étiquetage intelligent (RFID, tags...);
- outils d'information en temps réel des professionnels;
- logiciels et méthodes d'optimisation des transports de bien (chargement, tournées, gestion des stocks et des entrepôts, planification, relation clients...): SCM, TMS, SCM, ERP, WMS, éco-comparateurs et éco-calculateurs....
- normalisation : poids et mesures des unités de transport intermodales : conteneurs, caisses mobiles, semi-remorques afin d'optimiser leur remplissage et le transfert modal ;
- éco-conception (conditionnement et emballages) : optimisation des palettes, des emballages et suremballages logistiques et du packaging.

L'optimisation de la chaîne logistique peut être réalisée à différents niveaux :

- niveau stratégique, à long terme (implantation et nombre des entrepôts, choix des fournisseurs, stratégie de production) ;
- niveau tactique, à moyen terme (prévisions, planification de la production, de la distribution et du transport) ;
- et enfin niveau opérationnel, à court terme et en temps réel (production, stockage, distribution et gestion de l'interaction des étapes).

En plus de la modification et de la complexification de la structuration des flux et des processus, certaines tendances vont amener à faire évoluer la gestion de la chaîne logistique :

- le partage des données de référence entre les différents intervenants, à travers des bases de données com-



munes et normalisées (les logiciels en mode SaaS et le *cloud computing* ont un rôle à jouer) ;

- les entrepôts mutualisés fabricants-distributeurs ;
- la distribution mutualisée en zone urbaine : les flux de transport dans les villes sont regroupés pour décongestionner les centres-ville ;
- la logistique ascendante (*bottom-up* ou encore « adaptative ») fondée sur des décisions locales, à la différence de la logistique verticale qui planifie et optimise à l'avance ;
- la prise en compte de la logistique des retours (« reverse logistique ») pour les problèmes de recyclage ;
- la tendance à l'intermodalité ou la multimodalité des différents réseaux de transport.

### Applications

Tous marchés de la logistique, quel que soit le secteur (industrie, transport, santé) ou le mode (maritime, fluvial, messagerie, aérien, route...).

Elle comprend notamment :

- le transport de marchandises ;
- les activités d'opérations physiques (manutention) ;
- les activités d'entreposage ;
- et toutes les activités de pilotage et d'organisation opérationnelle de la chaîne logistique.

### Enjeux et impacts

L'objectif de l'optimisation de la chaîne logistique est de réduire les coûts tout en améliorant la qualité de service. Pour cela, plusieurs leviers d'optimisation sont disponibles : configuration de la chaîne, coûts de distribution, processus, délais, niveau des stocks...

Face à la mondialisation des marchés, l'enjeu est donc économique et représente une source majeure de gain de productivité pour les entreprises du secteur. Un réseau logistique performant est toujours source de compétitivité. Le développement de l'intermodalité constitue par ailleurs un enjeu important pour le futur de la chaîne logistique. Par exemple, la seule suppression de la rupture de charge pour l'acheminement par rail entre le réseau électrifié et le point de desserte est de nature à faire gagner une part

#### Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

#### Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation



importante (jusqu'à 50 %) du prix du transport par rail. On pourra également citer l'apparition de préoccupations liées à l'écologie auxquelles peut répondre l'optimisation de la chaîne logistique par une meilleure gestion des ressources. À ce titre, la « green logistique » est actuellement un nouvel axe de travail pour les grands groupes des transports de marchandise qui n'ont plus besoin d'optimiser leur chaîne logistique. Enfin, en termes d'aménagement du territoire, le dynamisme industriel est indissociable de la facilitation des circuits de transport.

## Acteurs

- **Recherche** : Laboratoire d'optimisation des systèmes industriels (LOSI) – UTT ; Laboratoire de mathématiques appliquées du Havre (LMAH), Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS) – CNRS
- **Pôles de compétitivité** : Nov@log, I-trans, Advancity, Movéo, LUTB2015
- **Transporteurs** : CFT, SNCF, ECR, Norbert Dentressangle, Géodis, STEF-TFE  
Logisticiens, commissionnaires de transport, « intégrateurs » : Norbert Dentressangle, FedEx, Gefco, Géodis, STEF-TFE, Kuehne et Nagel, FM Logistic, DHL Supply
- **Infrastructures** : RFF, VNF, les sociétés concessionnaires d'autoroutes (regroupées dans l'Asfa), les Grands ports maritimes  
Manutention : Unim, Paris-Terminal, GMP, Bolloré...  
Matériel : Alstom, Renault, Volvo, PSA, Bombardier, Chantiers navals de Haute-Seine, Siemens... et leurs fournisseurs spécialisés (Baudouin, Lohr...)  
Infologistique : Soget, Ilog (groupe IBM), Orange, GS1 France...
- **Entrepôts** : Sogaris, Gazeley, Prologis, Parcolog... et les fonds d'investissement : Axa Reim, Lasalle Investment...
- **Chargeurs** : AUTF et réceptionnaires (notamment commerce-distribution)

## Position de la France

En plus de nombreux donneurs d'ordre particulièrement expérimentés, onze des quinze plus importants prestataires de la gestion de la chaîne logistique sont situés sur le continent européen, qui est aujourd'hui considéré comme la zone économique la plus mature dans ce domaine.

La France occupe une position de premier plan, et est notamment dotée d'un milieu académique très développé.

## Analyse AFOM

### Atouts

Communauté académique développée, position géographique de la France privilégiée, nombreux acteurs.

### Faiblesses

Malgré sa position géographique, la France n'est pas toujours compétitive pour le passage de flux logistique.

### Opportunités

Amélioration de la compétitivité.

### Menaces

Fortes contraintes sur les coûts, exigences disparates dans la chaîne de la valeur créant des surcoûts, manque d'implication des activités d'« achats », problèmes concurrentiels pour la diffusion des données.

## Recommandations

Plusieurs recommandations peuvent contribuer à l'amélioration de la compétitivité de la filière :

- création d'un référentiel commun pour la mesure de la performance logistique ;
- développer les activités de modélisation et de simulation encore trop limitées et qui permettent pourtant de limiter les coûts ;
- développer l'offre de formation en approche globale des systèmes ;
- étudier et développer des modèles économiques pour développer l'innovation tout en respectant les fortes contraintes de coût ;
- impliquer les services achats qui doivent être intégrés comme chaînon à part entière.

## Liens avec d'autres technologies clés

16

21

28

29

66

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 63. Technologies de stockage et de gestion à bord de l'énergie électrique

### Définitions

L'exploitation en masse des batteries au lithium dans l'automobile pose d'autres questions – non technologiques – liées notamment au modèle économique de leur mise en circulation, à l'acceptabilité des nouveaux véhicules. Autre point non couvert par la présente description, l'approvisionnement en lithium apparaît aujourd'hui stratégique à certains acteurs, les ressources économiquement exploitables étant fortement concentrées dans le monde, et exploitées principalement par trois entreprises : SQM, Chemetall et FMC Lithium.

### Description

Les technologies couvertes concernent le stockage et la gestion de l'énergie électrique dans les véhicules :

- batteries Lithium principalement ;
- systèmes de gestion de batteries (BMS) ;
- supercapacités associées à la batterie ;
- gestion des appels d'énergie au sein du véhicule.

Les travaux de développement visent à :

- assurer et optimiser la gestion du stockage d'énergie et la cyclabilité ;
- diminuer les coûts de production ;
- assurer la sécurité des systèmes ;
- optimiser la recyclabilité, le désassemblage ou la seconde vie des batteries ;
- optimiser la gestion de l'énergie à bord, y compris dans les architectures hybrides.

Les verrous portent ainsi sur des questions liées :

- aux matériaux de la batterie (anode, cathode, électrolyte, packaging et matériaux d'assemblage, contacts électriques) ;
- à l'intelligence de gestion, répartie sur plusieurs étages de la chaîne (batterie, calculateur...).

### Applications

Ces technologies répondent à la demande d'électrification des véhicules pour de meilleures performances environnementales. Dans ce contexte, la contrainte de masse est un moteur du développement des batteries lithium, qui présentent des énergies spécifiques très fortes en dépit d'un coût élevé.

La capacité à stocker et délivrer de la puissance électrique en fonction des besoins est centrale dans le développement et l'acceptabilité des véhicules décarbonés. Les secteurs applicatifs comprennent l'automobile et le transport routier, l'avion, le ferroviaire et le naval, pour des applications liées à la propulsion ou aux fonctions auxiliaires.

Son introduction sera progressive, avec 10 % de ventes d'automobiles électriques anticipés en 2020. Selon Pike Research, le marché des batteries Li-ion pour véhicules électriques sera de 8 Mds\$ en 2015.

Enfin, la capacité mondiale de production devrait surpasser fortement la demande en 2015. À horizon de cinq à dix ans, cette tendance devrait conduire à des consolidations autour d'un nombre réduit d'acteurs.

### Enjeux et impacts

La technologie améliore l'impact environnemental des transports dans la mesure où l'ensemble du cycle de vie des batteries et du système de gestion est maîtrisé. Compte tenu des mutations induites dans l'industrie

automobile et de l'intensité concurrentielle dans les filières industrielles des transports, sa maîtrise est essentielle pour les acteurs français. Dans l'automobile, cette maîtrise conditionne des choix stratégiques forts.

De plus, c'est la baisse des coûts attendus du développement d'une filière de production de masse qui permettra l'utilisation de la technologie lithium dans d'autres secteurs du transport ou des applications stationnaires.

La technologie est diffusante et d'avenir. Diffusante car sa maîtrise et sa diffusion dans l'industrie sont essentielles pour relever les défis liés à l'électrification des fonctions des véhicules. D'avenir parce que les choix technologiques ne sont pas figés : la maîtrise technique est encore dans les mains des acteurs de la recherche, des grands groupes industriels et de quelques rares PME innovantes.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

- **R&D** : LRCS (Amiens) ; ICMCB (Bordeaux), laboratoire Laplace (Toulouse), IMN (Nantes), CEA-Liten, Ines, Ineris, Inrets, EDF, IFP Énergies nouvelles, pôles Mov'eo, LUTB, i-Trans, Tenerrdis, Véhicule du futur...
- **Intégrateurs** : Saft, CEA, Renault, Batscap, Johnson Controls Saft, Dow Kokam France (ex-SEV), E4V, Valeo
- **Utilisateurs** : Renault, PSA, EADS (Airbus, Eurocopter...), DCNS, Cnes, EDF, Alstom Transport, Heuliez, Gruau, Renault Trucks...

#### Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : en Europe, réseau Alistore ; laboratoire Argonne (États-Unis)...
- **Intégrateurs** : Sanyo, AESC, Lithium energy Japan, Mitsubishi, Nissan, Toyota (Japon), Samsung, Kokam, LG Chemical (Corée), BYD (Chine), Electrovaya (Canada), A123 Systems, Altair Nano, EnerDel, Gs Yuasa, Valence Technology, 3M (États-Unis), Magna Steyr (Autriche), Continental, Deutsche Accumotive, LiTec, BASF, Epcos, Bosch (Allemagne), Leclanché (Suisse)...
- **Utilisateurs** : Daimler, BMW, Volkswagen, EADS, (Allemagne), ESA (Europe), Ford, GM, etc.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Liens avec d'autres technologies clés

51

64

65

## Position de la France

La France dispose donc de compétences académiques de premier plan. Industriellement, France et Europe sont des challengers de l'Asie (Japon, Corée et Chine) et de l'Amérique du Nord.

La France et l'Allemagne portent leur industrie nationale, tirée à l'instigation des constructeurs automobiles et des acteurs de la chimie du lithium. La capacité de production française annoncée à horizon 2015 est de 150 000 packs (équivalents véhicule électrique). Toutes les catégories d'acteurs sont représentées dans le paysage français, à l'exception des fournisseurs de matières premières. Bolloré a pris des participations dans des gisements de lithium en Bolivie pour sécuriser ses approvisionnements futurs.

Les Français Batscap, Epcos et Saft (sous contrôle américain) sont les principaux fabricants européens de supercondensateurs.

## Analyse AFOM

### Atouts

Communauté de la recherche de niveau international sur les matériaux.

Premier fabricant européen (Saft) et acteurs industriels en position challengers.

Acteurs industriels sur l'électronique embarquée et l'intégration dans les véhicules.

Soutien actif et continu des pouvoirs publics.

### Faiblesses

Peu de fabricants proprement dits de matériaux en France.

### Opportunités

Marchés émergents de l'électrification des véhicules procurant l'occasion aux challengers de prendre des positions sur le marché.

### Menaces

Risque sur le rythme d'émergence des marchés de masse.

Diversité des choix technologiques.

Concurrence asiatique et américaine forte. Le Japon avec Sanyo (qui a racheté Panasonic) est le premier.

## Recommandations

Les conditions pour le développement de ces technologies ressortent d'une part, de la poursuite des travaux de recherche qui permettront de faire vivre les générations successives de produits, d'autre part, de l'émergence réelle des marchés applicatifs visés, qui seule permettra d'assurer la pérennité de la filière en cours de constitution.

Sur ces sujets, le soutien de l'état à l'industrie est déjà fort à travers l'investissement industriel (FSI), le soutien à l'innovation (plateforme Steeve), le fonds démonstrateur et les commandes massives du plan national véhicule électrique.

L'autre facteur clé de succès qu'il faut maîtriser pour l'industrie française est le chantier de la normalisation, notamment sur la sécurité. Pour arriver à des déploiements effectifs, sécurité et sûreté doivent être traitées en parallèle des développements technologiques. Une analyse stratégique est en cours au C.A.S.

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 64. Électronique de puissance



### Description

L'électronique de puissance est une technologie clé dans un environnement qui utilise de plus en plus l'électricité, et ceci pour des usages qui tiennent tant à la production qu'à la conversion et à l'usage de l'électricité.

Il s'agit d'un groupe technologique homogène qui répond aujourd'hui à des enjeux industriels importants. Il peut s'agir de composants (transistors, thyristors...) comme de matériaux (III-V, GaN sur Si...) ou d'architecture, les différents aspects étant interdépendants. À tous les niveaux les verrous technologiques sont liés à la nécessité de pouvoir gérer des moyennes et grandes puissances à des fréquences plus élevées, dans des conditions d'environnement plus rudes, notamment en vue d'une intégration mécatronique.

Ce champ technologique pose des questions de développement liées aux verrous technologiques suivants :

- Les matériaux doivent évoluer pour permettre une

meilleure tenue en température et de moindres pertes. Une conséquence sera la possibilité de monter en fréquence ou encore de faciliter l'intégration dans les systèmes mécatroniques. Les voies de développement concernent les matériaux à grand gap : GaN sur Si, SiC, l'IGBT, diamant.

- Les composants actifs et passifs sont aujourd'hui fabriqués par des acteurs asiatiques. En conséquence, les architectures des systèmes de puissance en Europe sont dépendantes de ces développements, et non l'inverse. Les ruptures technologiques à venir sur les matériaux créeront des opportunités pour modifier les rapports de force et éventuellement renforcer les positions française et européenne sur l'amont de la chaîne de valeur.

- L'architecture est très liée aux deux points précédents et également aux applications potentielles dans les domaines de la mécatronique, de la conversion de puissance, etc.

- La fiabilité des composants est un impératif des systèmes d'électronique de puissance, le taux de défaillance des systèmes devant être compatible avec les contraintes des différentes filières.

- L'intégration et les technologies de production liées à ces différentes ruptures attendues entrent également dans le champ de la technologie. Leur maîtrise est un verrou du positionnement sur le marché de la filière française.

L'électronique de puissance comprend notamment les technologies de transformation et de mise en forme des courants d'alimentation pour la traction et la puissance, ainsi que les technologies de commande électronique sous forte tension et fort courant.

Ces technologies sont communes avec le domaine de l'énergie. Notamment, l'électronique de conversion est un élément clé de tous les modes de génération à base d'énergies renouvelables.

### Applications

#### Transports

- Ferroviaire : l'électronique de puissance est présente dans les dispositifs de traction électrique, de captage de courant, de commande des systèmes de puissance, de génération de courant au freinage...

- Routier : l'électrification du véhicule, est bel et bien amorcée avec la généralisation de l'hybridation et l'émergence des véhicules électriques de nouvelle génération. Les architectures hybrides, les alternodémarreurs, la gestion de l'énergie électrique, la traction, la génération au freinage sont autant de systèmes concernés.

- Aérien : l'avion plus électrique est aujourd'hui une réalité. Les fonctions hydrauliques sont de plus en plus remplacées par des commandes électriques qui requièrent

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

là encore la gestion de la puissance.

• Naval : l'hybridation de la propulsion dans le domaine naval est un fait établi.

## Énergie

La conversion de puissance dans le domaine de la génération d'énergie touche toutes les technologies de production. Dans les applications pour lesquelles se posent des problèmes de conversion comme par exemple le photovoltaïque, ou l'éolien, la gestion de la grille et de la production décentralisée est également un champ d'application.

De manière connexe, l'électronique de puissance intéresse aussi d'autres secteurs, tels que les lasers de puissance, les outils de production, les télécoms, l'éclairage, etc.

## Enjeux et impacts

La chaîne de valeur est dominée par les acteurs japonais. Ils maîtrisent les technologies de composants passifs et actifs, et en conséquence imposent en partie les architectures des systèmes qui en découlent. En France, les forces sont dispersées principalement sur les domaines applicatifs.

Les enjeux économiques sont importants : le marché mondial des modules et composants de puissance est de l'ordre de 390 M€ en 2009 et devrait croître à 570 M€ en 2015 d'après Yole ; 65 % de ce chiffre d'affaires est représenté par le seul secteur ferroviaire. Le cabinet Décision précise dans une étude d'avril 2009 que la croissance est attendue à 12 % sur la période 2009-2013.

L'électronique de puissance est enfin une des clés pour répondre aux enjeux environnementaux en lien avec les technologies d'avenir liées.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Laboratoires** : Satie (ENS Cachan), Inrets, Leg, L2ES, Laas, L2EP, IFP Énergies nouvelles
- **Fabricants** : Schneider Electric, Converteam, Thales, Alcatel
- **Intégrateurs** : Areva, Valeo, Alstom, Continental, Airbus, Zodiac, Renault, PSA Peugeot-Citroën, DCNS, EADS, EDF...
- **Organismes** : plate-forme Primes, pôles de compétitivité Mov'éo, Fieec

### Principaux acteurs étrangers

- Siemens, ABB, Mitsubishi Electric, Fuji, Hitachi, Toshiba, Infineon, General Electric, Semikron, Bombardier...

## Position de la France

La filière française est aujourd'hui dispersée selon les secteurs applicatifs de l'électronique de puissance. Cette dispersion implique un faible poids sur les fournisseurs asiatiques pour la prise en compte des contraintes des industriels dans la conception des composants. Les ruptures technologiques attendues peuvent créer l'opportunité de faire émerger ou croître des acteurs français ou européens sur les composants et leurs technologies de fabrication, adaptés aux usages.

L'étude de Décision indique que la production française en électronique de puissance représente 9% de la production européenne hors transports, pour lesquels la part française est plus importante.

## Analyse AFOM

### Atouts

Acteurs de premier plan en France sur l'intégration et sur la conception des composants.

### Faiblesses

Pas d'acteurs industriels sur la fabrication du composant. Absence d'une filière organisée.

### Opportunités

Ruptures technologiques à venir peuvent créer l'occasion de renforcer les positions de la France.

## Recommandations

L'absence d'organisation forte en filière de l'électronique de puissance, ventilée sur les secteurs applicatifs, nuit aujourd'hui à la transmission des compétences et de l'expertise. Des transferts seraient à organiser entre les différentes filières pour tableur sur l'expertise de l'une pour le développement et la compétitivité des autres.

## Liens avec d'autres technologies clés

59

63

65

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 65. Mécatronique

### Description

Initiée par les grands programmes de l'aérospatiale et de l'armement, la mécatronique reprend l'ensemble des procédés de conception et de production pour une intégration plus poussée des fonctions mécaniques, électroniques et logicielles, ainsi que les produits qui en résultent.

La mécatronique nécessite de rassembler des compétences techniques variées (mécanique, hydraulique, pneumatique, électronique, informatique, automatique, métrologie...) mises en commun à travers des démarches de co-ingénierie et de travail collaboratif. La combinaison de ces technologies doit être étudiée dès la phase de conception des systèmes mécatroniques de façon à garantir leur fiabilité : analyse fonctionnelle, simulation du comportement dynamique et évaluation de la sûreté de fonctionnement.

Fondamentalement, un système mécatronique a pour finalité une action physique pilotée par une brique intelligente. Ainsi, les composants suivants entrent dans son champ d'applications :

- actionneurs autonomes à faible et à forte puissance ;
- capteurs de différentes natures (pression, température, imagerie...);
- organes de conversion, de stockage et de gestion de l'énergie ;
- composants actifs et passifs ;
- lois de commande et logiciels embarqués ;
- systèmes communicants, dont les technologies sans fil.

L'intégration mécatronique accompagne la tendance à la miniaturisation des systèmes électroniques et électromécaniques avec la réalisation de systèmes toujours plus compacts.

### Applications

Tous les marchés des transports sont concernés par la conception, la fabrication et la mise en œuvre des dispositifs mécatroniques. Elle constitue en effet une des bases de l'intelligence embarquée aujourd'hui.

Dans le secteur automobile, la mécatronique accompagne l'augmentation du niveau d'équipement et l'intégration de fonctions de plus en plus complexes : systèmes pour l'aide à la conduite et la sécurité active (freins, roulements et pneus « intelligents »), optimisation énergétique du groupe motopropulseur thermique et/ou électrique (contrôle d'injection, de température, gestion de la charge électrique), systèmes de bord communicants... La mécatronique joue bien évidemment un rôle prépondérant dans la tendance à l'hybridation et à l'électrification des véhicules par l'apport d'un pilotage et d'une

optimisation plus fine des paramètres du ou des moteurs. Pour le secteur aéronautique, la mécatronique intervient dans de nombreux systèmes de l'avion. Elle a un rôle particulièrement important dans la tendance à l'électrification totale des commandes (*fly-by-wire*) opérée sur les avions de conception récente (Airbus A380, A400M, Boeing 787). Dans le domaine ferroviaire, la mécatronique permet de réduire la taille des éléments moteurs et facilite leur intégration, elle est notamment employée par Alstom pour la conception des bogies articulés de la nouvelle automotrice grande vitesse (AGV).

Enfin dans l'industrie navale, la mécatronique intervient dans une moindre mesure pour les systèmes de gestion de l'énergie à bord.

Il est à noter que la mécatronique joue un rôle important dans le domaine de la production (machines-outils, robots...), particulièrement pour l'industrie des transports. On retrouve aussi la mécatronique dans l'électronique grand public, les machines de travaux publics, dans le secteur médical.

### Enjeux et impacts

Outre l'enjeu industriel indéniable, la mécatronique permet une réduction des consommations énergétiques par une meilleure intégration des sous-systèmes, et autorise des entreprises du secteur de la mécanique traditionnelle à proposer des produits à plus forte valeur ajoutée à leurs clients à travers cette intégration :

- conception de produits aux performances supérieures aux produits traditionnels ;
- réalisation de nouvelles fonctionnalités ou réduction des coûts ;
- augmentation des performances et de la flexibilité des équipements de production ;
- réduction du nombre de composants critiques.

La mécatronique représente aujourd'hui en France un volume de production global de 4,3 Mds € pour un effec-



#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

tif de 28 200 personnes. 62 % de ce chiffre d'affaires étant réalisé à l'export [5.47].

Deux verrous sont toutefois à noter concernant son développement :

- la multiplicité des métiers et des technologies à maîtriser. La mécatronique impose notamment de faire dialoguer les experts de différents domaines entre eux. Ces difficultés peuvent être surmontées par une mise en réseau efficace des acteurs et par la formation d'ingénieurs et techniciens pluridisciplinaires ;
- les outils et méthodes à disposition des concepteurs de systèmes mécatroniques sont aujourd'hui très divers et trop spécifiques pour apporter un niveau de fiabilité systématique aux phases d'ingénierie. Des projets sont actuellement menés pour développer des outils génériques pour l'ensemble de la filière. On pourra citer le projet O2M (outils de modélisation et de conception mécatronique) de Mov'eo.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : CEA Leti ; Laboratoire électromécanique de Compiègne (LEC) – UTC ; Laboratoire mécatronique 3M (M3M) – UTBM ; laboratoire systèmes et matériaux pour la mécatronique (Symme) – Université de Savoie ; Département mécatronique de l'ENS Cachan
- **Pôles de compétitivité et réseaux** : Thésame, Mov'eo, Arve-Industries, Viameca, Aerospace Valley, Astech, Artema, Cetim, PFA
- **Constructeurs, intégrateurs et équipementiers** : Airbus, Renault, PSA Peugeot Citroën, Valeo, Continental, Johnson Controls, SNR, ST Microelectronics, Michelin, Schneider Electric, Groupe Gorgé, ECA, Cybernetyx, Dassault Systèmes, Zodiac Aerospace



## Position de la France

La présence de donneurs d'ordre à vocation mondiale (constructeurs) et les initiatives de mise en réseau par diverses organismes (Thésame, Artema, Cetim, pôles de compétitivité...) ont permis de développer un potentiel d'acteurs important en France, notamment autour de la filière automobile.

Par ailleurs, des initiatives françaises de normalisation des méthodes de conception ont abouti à la publication de deux normes et à la création d'un groupe technique international (Iso) dans le domaine de la mécatronique Iso/TC 184/AH Mechatronics.

## Analyse AFOM

### Atouts

Communauté structurée ou du moins se structurant, nombre de formations en hausse, initiative de normalisation.

### Faiblesses

Frilosité de certains industriels liée aux problématiques de complexité, de fiabilité et de sûreté de fonctionnement.

### Opportunités

Amélioration de la compétitivité de la filière transport, nombre d'applications croissant.

### Menaces

Maintien d'un cloisonnement entre les différentes disciplines qui pourrait ralentir l'essor de la mécatronique.

## Recommandations

La mécatronique est jugée comme étant particulièrement clé pour améliorer la compétitivité de la filière transport en France. Pour cela plusieurs actions doivent être menées :

- développer l'offre de formation, en particulier l'offre de formation continue qui permettrait aux techniciens et ingénieurs d'avoir une vision mécatronique globale ;
- soutenir les projets de recherche appliquée et collaborative sur les trois thèmes prioritaires de la mécatronique : sûreté de fonctionnement, méthodes et outils de conception, micro-machines de production ;
- maintenir l'investissement (le leadership) de la France dans les travaux de normalisation.

## Liens avec d'autres technologies clés

13

58

59

64

69

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 66. Communications et données

### Définitions

De manière connexe aux communications proprement dites, se posent des questions concernant les données elles-mêmes :

- l'acquisition des données : les capteurs, le traitement, la fusion et la mise en forme des données liées au fonctionnement du sous-système (véhicule et son chargement), du système (trafic, incidents, disponibilité, information multimodale), à la localisation des mobiles, etc. ;
- la gestion des données renvoie à des questions matérielles (bases de données, leur sécurité, leur fiabilité), organisationnelles (interopérabilité des bases, standardisation internationale des formats), juridiques (protection des données personnelles, responsabilité des acteurs), économiques (modèle économique de l'usage et de la gestion des données, déploiement des services et des infrastructures).

### Description

Les technologies et protocoles de communication répondent aux enjeux spécifiques des différents modes et de l'intermodalité. Les communications véhicule-véhicule (V-V) et véhicule-infrastructure (V-I) seront de plus en plus sollicitées pour assurer un recueil des données de trafic à destination des opérateurs d'infrastructures, faire coopérer des systèmes pour la sécurité et la gestion du trafic, ou pour assurer les missions de maintenance prédictive ou de services de confort aux utilisateurs des transports.

Dès lors que le transport est de plus en plus géré comme un système intégré, le recueil et l'échange des données entre objets et acteurs deviennent des fonctions essentielles, au même titre que la remontée d'information vers un calculateur de bord est maintenant une réalité incontournable du système « véhicule ».

De fait, l'usage des communications hertziennes se développe à différentes échelles :

- entre véhicule et infrastructure à courte portée pour de l'échange d'information ponctuelle, conjoncturelle ;
- de véhicule à véhicule à moyenne portée pour échanger ou relayer des informations de sécurité ou de trafic ;
- de véhicule à infrastructure à longue portée pour des données liées au fonctionnement du système ou de ses composants, ou encore de l'information de service ou de divertissement à usage des passagers ;
- enfin, de passager à infrastructure pour l'information multimodale en réseau extérieur ou couvert (métro).

Ces technologies s'intéressent principalement aux :

- vecteurs, protocoles, normes de communication en V-V et V-I dans les différents modes, à des fins de gestion, de tarification et de sécurité (bas débit à fortes contraintes de fiabilité) ou de services de « confort » (haut débit à contraintes réduites). L'interfaçage avec les téléphones mobiles est à prendre à considération dans ces axes de travail.
- modèles économiques de déploiement et d'usage de ces vecteurs : si les domaines aérien et ferroviaire ont certaines capacités de mise en œuvre des systèmes innovants en raison des enjeux économiques et de sécurité, le secteur routier doit assoir ces déploiements sur des modèles économiques rentables à court terme. La filière transport et logistique est déjà engagée dans des démarches de standardisation sur les échanges de données.
- contraintes de fonctionnement en fonction des applications : fiabilité, continuité, interopérabilité, prise en compte de la massification, etc.

Dans certains cas, des protocoles spécifiques sont requis pour garantir par exemple la disponibilité des canaux pour l'information d'urgence, la continuité du transfert des don-

nées pour le suivi en continu et la maintenance prédictive des avions ou des trains, l'interopérabilité internationale au regard du standard ferroviaire ERTMS, etc.

### Applications

Dès lors que l'on considère le transport selon un angle systémique, les applications des télécommunications sont très variées. On peut cependant les considérer selon deux axes, tous les modes étant concernés.

#### Les applications critiques

Elles concernent le fonctionnement du système en sécurité. À différents niveaux, les fonctions applicatives sont par exemple la transmission de messages d'urgence ou le *e-call*, les informations de localisation et de fonctionnement des avions et trains, la gestion du trafic, la gestion des flottes, le suivi des conditions de transport des marchandises, les fonctions de tarification ou de contrôle d'accès...

#### Les applications de services

Ces services représentent une source de revenus potentielle, à même de permettre le financement des systèmes et infrastructures de communication critiques. Ce type d'offre est d'ores et déjà déployé par certaines compagnies aériennes (accès à Internet à bord). Dans l'automobile, la vente de services de confort permettra le financement des équipements de communication liés à la sécurité ou à la maintenance prédictive.

Enfin, les services liés à un enjeu économique dans le secteur de la logistique sont également des champs d'applications majeurs de ces technologies.

### Enjeux et impacts

Ces technologies répondent aux enjeux :

- écologique en permettant une meilleure gestion des transports (ciel ouvert pour l'aéronautique, gestion des créneaux ferroviaires, gestion du trafic routier visant une réduction des congestions, optimisation du transport multimodal...);
- de sécurité : transmission d'informations sur les incidents et accidents. Il est notamment envisagé d'imposer à brève échéance la fonction d'*e-call* dans les automobiles neuves, ce qui représenterait un marché européen de 13 millions de véhicules particuliers dans l'UE15 ;
- la qualité de service des systèmes de transport, monomodaux ou multimodaux, favorisant également l'information et la planification. Le développement de ces systèmes permettra aussi le déploiement de média d'information multimodale.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Industriels** : Orange, SFR, Bouygues Telecom, Sagem, Thales, Renault, PSA Peugeot-Citroën, Alstom, Airbus, Valeo, EADS, Atos origin, Senda, Globalsys, MTS, CTS...
- **Opérateurs d'infrastructures** : Vinci Autoroutes, Sanef, RFF, Aéroports de Paris, RATP, DGAC, Eurocontrol, Nov@log

## Position de la France

Les usages imposent que le développement des technologies soit normalisé au niveau européen *a minima*. La France dispose d'acteurs importants pour le déploiement des systèmes de communication dans l'automobile, avec des opérateurs, des constructeurs, etc. Sur le plan des technologies et des déploiements, la France est en léger retard sur l'Allemagne, qui voit ses constructeurs développer et tester activement les technologies de communication dans le cadre des projets européens notamment.

## Analyse AFOM

### Atouts

Opérateurs importants, constructeurs automobile et équipementiers nationaux.

### Faiblesses

Faible coordination des différents acteurs de la chaîne de valeur.

### Opportunités

Déploiement de l'*e-call* aux États-Unis et en Europe.  
Déploiement de l'ERTMS.  
Développement de services multimodaux.  
Développement commercial des ordiphones...

### Menaces

Risque de développements de protocoles antagonistes.

## Recommandations

Le développement et le déploiement des communications dans le secteur automobile se feront sur la base de nouvelles offres de services. Cependant, le renouvellement d'un parc sur une durée typique de douze à quinze ans bride le déploiement des usages. Les industriels établis et les start-up travaillent sur les déploiements et la prise en compte des dispositifs portables dans le système. La généralisation des systèmes de communication impose une approche organisationnelle (conduite du changement) et systémique. Elle doit établir le dialogue entre tous les acteurs de la chaîne pour des déploiements de masse des systèmes, y compris expérimentaux. Enfin, la promotion des standards et normes d'interopérabilité internationaux par opposition aux standards propriétaires est un élément clé pour la compétitivité des entreprises intégratrices et utilisatrices de la chaîne logistique. La participation active des industriels et opérateurs français aux instances de normalisation est stratégique.

## Liens avec d'autres technologies clés

14

16

19

61

62

69

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 67. Démarche d'optimisation de l'ingénierie et de la production

### Définitions

**Kanban** : outil de management visuel mis en œuvre par des étiquettes permettant un suivi optimal de la production.

**5S** : technique de management d'origine japonaise basée sur cinq principes : débarrasser, ranger, nettoyer, ordonner, être rigoureux.

**Gemba Walk** : technique de management sur le terrain qui consiste à envoyer les responsables de production sur le terrain à la rencontre des opérationnels.

### Description

Le concept d'optimisation de l'ingénierie et de la production se réfère aux démarches dites *lean* (littéralement « maigre » ou « svelte »). Ces dernières visent à améliorer l'efficacité des processus d'ingénierie et de fabrication par la recherche des sources de pertes de productivité dans l'ensemble de la chaîne de la valeur.

Développée puis mise en œuvre dès les années trente à travers le système de production Toyota (TPS), les démarches *lean manufacturing* ont permis au constructeur japonais de se hisser au rang des premiers constructeurs automobiles mondiaux.

Ces démarches sont par contre relativement plus récentes lorsqu'il s'agit de leur application à la conception. De façon plus globale, le *lean* peut en effet être appliqué aux processus de R&D complets à travers le *lean engineering*, le *lean design* et le *lean development*.

Structuré autour de plusieurs outils et méthodes (tels que le Kanban, le 5S, le traitement des gaspillages (Muda), le changement d'outil rapide (Smed), le juste-à-temps, les détrompeurs, le management visuel, le Gemba Walk...), le *lean manufacturing* est basé sur l'application de différents principes :

- arrêt immédiat de la production lors de la détection d'un défaut ;
- analyse des problèmes et éliminations des sources d'erreurs, recherche de stabilité ;
- réaménagement optimal des équipements de production pour se concentrer sur les tâches à valeur ajoutée ;
- fluidification des processus et organisation en flux tendus.

Pour ce qui est de son application à l'ingénierie, les démarches *lean* consistent à repousser au plus tard les choix de conception contrairement aux approches classiques (cahier des charges figé dès le départ). Les spécifications et le développement sont focalisés sur les étapes créatrices de valeur. Parallèlement à cela, la priorité est mise sur l'accumulation des retours d'expérience, les outils mis en œuvre sont alors la méthode PDCA (*Plan Do Check Act*), la méthode Lamda (*Look Ask Model Discuss Act*), les courbes de sensibilité (*Trade-off et Limits*), les cartographies de chaîne de valeur ajoutée...

La conception *lean* a deux objectifs : un *time-to-market* le plus court possible et la réduction des coûts globaux de développement par l'élimination du gaspillage de ressource.

### Applications

Tous les secteurs industriels sont concernés, *a fortiori* le secteur des transports, pour lequel la démarche *lean* peut être une clé de résistance à la concurrence des pays à bas

coûts. Le *lean* peut être un facteur clé de succès du développement, voire de la relocalisation des entreprises.

Les constructeurs automobiles et les grands équipementiers français ont instauré des démarches *lean manufacturing* depuis le début des années 2000, et tentent aujourd'hui de diffuser ces pratiques auprès de leurs fournisseurs. En témoigne l'initiative de la PFA (Plateforme de la filière automobile) en mars 2010 pour promouvoir le *lean* à travers tous les acteurs de l'industrie automobile française : cette dernière souhaiterait améliorer de 15 % leur efficacité en deux ans en se basant sur la capitalisation et le retour d'expérience des grands industriels.

Le *lean manufacturing* est aussi appliqué depuis un certain temps par les grands acteurs de l'aérospatial (Airbus, Astrium, Safran), du ferroviaire (Alstom) ou du naval (STX). De la même façon que pour le secteur automobile, ces industriels souhaitent aujourd'hui diffuser ces pratiques chez leurs fournisseurs.

Utilisé depuis quelques temps pour le développement logiciel en complément des approches dites « agile », le *lean* pour l'ingénierie est un phénomène plus récent. Il est encore peu développé dans l'industrie française, le secteur de l'aérospatial semble précurseur avec des acteurs tels que EADS, Snecma ou Thalès qui appliquent ces méthodes.

### Enjeux et impacts

Ces méthodes constituent une clé pour la compétitivité des entreprises dans les années qui viennent.

Dans un contexte difficile, l'amélioration du gain de productivité, la flexibilité et la réactivité de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement apportées par le *lean manufacturing* constituent un avantage concurrentiel important.

De même, l'amélioration de la rapidité de mise sur le marché par une fiabilisation de la conception par le *lean engineering* constitue aussi un avantage non négligeable.

Le *lean manufacturing*, intégré par les grands groupes, est jugé comme étant une technologie diffusante auprès des PME/PMI.

Le *lean engineering* qui n'en est encore qu'à ses prémices est quant à lui jugé d'avenir.

Ce type de démarche nécessite toutefois de repenser l'organisation de l'entreprise que ce soit pour la production ou pour l'ingénierie et impose des changements parfois lourds. Pour cette raison des réseaux se sont mis en place pour leur promotion et la diffusion de bonnes pratiques.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Pôles de compétitivités et acteurs du soutien aux PME** : Thésame, PFA, Cetim, Artema, Mov'eo, LUTB2015, Nova@log, les Chambres de Commerce et d'Industrie, le département Performance de l'Ardi Rhône-Alpes, l'Institut Lean France, le Lean Global Network à l'échelle mondiale
- **Acteurs académiques et formation** : Télécom ParisTech, Ecam, Ensam
- **Groupes industriels** : Renault, PSA Peugeot Citroën, Valeo, Airbus, STX, Alstom, Safran, Thalès
- **Acteurs du conseil** : AL Consulting, Chorege, Efidyn, GMI – Goupe Emergence, Ineum Consulting, JMA Consultants, Lean Key, Lean Training, Moventeam, PMGI, Schneider Electric Consulting, Toptech, Vinci Consulting

## Position de la France

Le Japon et les États-Unis sont à la pointe de l'application de ce type de démarche.

En France les grands constructeurs et les fournisseurs de rang 1 ont déjà bien intégré ces démarches. La diffusion est aujourd'hui en cours auprès de leur multitude de sous-traitants. Le réseau des acteurs est relativement bien développé avec notamment un centre de gravité en région Rhône-Alpes.

Le *lean engineering* est quant à lui encore peu répandu en France.

## Analyse AFOM

### Atouts

Acteurs industriels importants déjà bien avancés sur les démarches *lean* et diffusant auprès de leurs sous-traitants.

Écosystème d'acteurs du conseil en *lean* bien implanté. Montée en puissance du réseau, soutien de la PFA.

### Faiblesses

Secteur académique tout juste émergent, manque de compétences.

Les acteurs français réalisent parfois une application trop partielle des principes du *lean*.

### Opportunités

Réduction des coûts de conception et de production, résistance face aux marchés émergents.

### Menaces

Dimension sociale du *lean* liée à une mauvaise image (précipitation et implémentation du *lean* par les outils sans prendre en compte les aspects management, ce qui dévalorise les opérationnels).

Démarche à long terme (il faut entre trois et cinq ans pour qu'une entreprise devienne *lean*).

## Recommandations

Le développement et la diffusion du *lean* dans les entreprises ne pourra se faire sans une communication adéquate pour susciter l'adhésion de toutes les parties prenantes. Le *lean* peut être en effet considéré comme une simple technique de réduction des coûts pour beaucoup plutôt que comme un moyen d'améliorer la performance. Une école du *lean* permettrait d'en promouvoir la pratique.

Par ailleurs, il est nécessaire de favoriser la mise en réseau et les actions collectives particulièrement efficaces pour la diffusion de ces méthodes, tels que celles réalisées par la PFA ou par Thésame.

Idéalement, le *lean* devrait être développé de façon à ne plus être « clé » à long terme en France (cinq à dix ans).

### Liens avec d'autres technologies clés

13

21

62

69

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 68. Matériaux et technologie d'assemblage pour l'allègement

### Définitions

Matériaux composites : assemblage de deux matériaux, un renfort assurant la tenue mécanique (fibres) et une matrice qui peut être organique, métallique ou céramique.

### Description

L'allègement des véhicules constitue un enjeu fort pour l'amélioration de l'efficacité énergétique du secteur des transports. Cet allègement peut être réalisé par l'apport de nouveaux matériaux, mais aussi par la mise en œuvre de procédés innovants de fabrication pour la réduction du volume ou de la complexité des assemblages.

Parmi les nouveaux matériaux, on pourra citer :

- les matériaux composites déjà utilisés depuis un certain temps mais qui sont en permanence améliorés notamment par le choix de nouveaux renforts et matrices ou par l'utilisation de nouveaux procédés de fabrication : nouveaux composites thermoplastiques, matériaux thermostructuraux hautes ou moyennes températures, structures composites à matrices organiques ;
- les nouveaux aciers à hautes limites d'élasticité permettant de conserver les performances mécaniques actuelles avec des structures plus légères ;
- les métaux autres que l'acier. Il peut notamment s'agir d'alliages à base d'aluminium, de magnésium ou de titane.

Parallèlement à cela, les procédés d'assemblage sont améliorés pour produire des pièces toujours plus fiables avec moins de ressources : les techniques avancées de soudage (par friction, laser, hybride laser, plasma... en général sans apport de matière), les nouvelles méthodes de tissage et moulage de matériaux composites, les techniques d'assemblages multimatériaux (avec des enjeux sur le comportement de tels assemblages), la fabrication directe de pièces (par frittage, fusion, impression 3D...) ou encore l'usinage grande vitesse.

L'optimisation des pièces tirant parti des nouveaux matériaux et procédés d'assemblage permet des gains de poids parfois considérables qui se répercutent immédiatement sur la consommation du véhicule.

Il est à noter que les outils et méthodes de conception et de validation font aussi partie des technologies clés et sont détaillés dans une fiche dédiée.

### Applications

La multiplication des équipements, l'amélioration du niveau de performance des motorisations et la disponibilité d'hydrocarbures bon marché ont contribué à l'augmentation considérable de la masse des véhicules routiers ces dernières décennies. Aujourd'hui les constructeurs et équipementiers cherchent à inverser la tendance. Les réductions se font sur :

- le groupe motopropulseur (moteur, transmission, boîte de vitesse...) : les contraintes sont d'ordre mécaniques et thermiques;
- l'habitacle et la carrosserie : avec des contraintes de résis-

tance aux chocs, à la corrosion, aux rayures, ou encore esthétiques.

À plus long terme (dix ans), la voiture tout composite pourrait être produite en grande série.

Le secteur aéronautique n'est pas en reste, ce dernier ayant bien avant l'automobile cherché à réduire la masse des avions pour réduire les coûts d'exploitation. Les dernières générations d'avion, notamment l'Airbus A350 XWB, le Boeing 787 ou encore le futur Dassault Falcon, font ainsi la part belle aux matériaux composites pour les éléments de structure ou de voilure (53 % de la masse de la structure primaire est en matériaux composites dans l'A350). Le démonstrateur « Avion tout composite » initié dans le cadre du grand emprunt par le Corac (Conseil pour la recherche aéronautique civile) vise à réaliser des gains de près d'une tonne sur les fuselages actuels, ce qui permettrait d'économiser 175 tonnes de kérosène par an et par avion.

Bien que l'allègement soit moins important que dans d'autres secteurs, l'industrie ferroviaire commence à s'y intéresser pour réduire la masse des motrices et des rames. Par exemple Alstom inclut des matériaux composites dans la conception des bogies de sa nouvelle automotrice grande vitesse (AGV).

### Enjeux et impacts

Dans tous les cas, les problématiques matériaux répondront à la question « comment faire plus léger en conservant les mêmes performances fonctionnelles par ailleurs ? ». Dans un contexte réglementaire de plus en plus restrictif concernant les émissions, l'allègement constitue un enjeu de taille pour limiter les consommations et améliorer la performance énergétique des véhicules.

Selon une étude récente d'un bureau d'étude [5.24], une diminution du poids des voitures de 21 % est réalisable d'ici à 2017, et de 38 % d'ici à 2020 (hors groupe motopropulseur). La problématique d'allègement est particulièrement importante pour répondre à l'électrification des transports terrestres et contrebalancer le poids des batteries (jusqu'à plusieurs centaines de kilos pour une voiture électrique standard) et des groupes motopropulseurs de plus en plus sophistiqués.

Le secteur aérien est quant à lui particulièrement intéressé par le double enjeu auquel répond l'allègement : diminution du coût d'exploitation des nouveaux avions demandée par les compagnies aériennes, et limitation des émissions de CO<sub>2</sub> (un quart des émissions dans le domaine des transports en France). À noter que dès 2012, le secteur aérien sera intégré au système communautaire européen de quota d'émission, ceci afin de responsabiliser les compagnies aériennes.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

Parallèlement à l'enjeu énergétique, les nouveaux matériaux et techniques d'assemblage doivent répondre à d'autres préoccupations :

- la sécurité par un renforcement des structures, des propriétés d'absorption accrue ou encore pour une meilleure résistance à l'environnement (feu, eau, poussière...);
- les problèmes de recyclabilité et de traitement des déchets : en 2015, 95 % des matériaux utilisés dans la fabrication d'une voiture commercialisée en Europe devront être recyclables ;
- les performances acoustiques et la tenue aux vibrations. La réduction de la pollution sonore est notamment un enjeu très fort dans le domaine des transports ;
- l'esthétique pour les matériaux apparents.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : Critec Matériaux ; l'Institut Carnot MIB ; Cetim ; Onera ; Laboratoire des Composites ThermoStructuraux (LCTS) – CNRS, Université de Bordeaux ; Laboratoire d'ingénierie des matériaux de Bretagne (LIMATB), Rescoll
- **Pôles de compétitivité** : EMC2, Mov'eo, ID4Car, Aerospace Valley, LUTB2015, Astech, Pegase, Plastipolis
- **Industriels** : Airbus, Arcelor, Alcan, Aircelle (Safran), Dassault Aviation Faurecia, Plastic Osmium et Inoplast, Renault, PSA Peugeot Citroën, Hexcel Composites, Sora Composites, Timet Savoie, Montupet, ainsi que de nombreux sous-traitants et équipementiers

## Position de la France

La France est plutôt bien placée pour ce qui est du travail sur les matériaux et l'allègement pour le secteur des transports. Elle bénéficie en effet de nombreux industriels donneurs d'ordre et de fabricant de matériaux innovants de renommée mondiale. Ces acteurs possèdent des centres d'innovation en France. Le réseau académique est aussi particulièrement développé sur le sujet des nouveaux matériaux et alliages.

## Analyse AFOM

### Atouts

Potentiel de recherche élevé et nombreux acteurs industriels de premier plan en France.

### Faiblesses

Cloisonnement entre les différentes industries.

### Opportunités

Secteur des transports très demandeur, marchés en croissance.

### Menaces

Prix (rareté) de certains matériaux qui induisent des problèmes de sûreté d'approvisionnements, problèmes liés à la récupération et au recyclage des matériaux composites.

## Recommandations

Plusieurs actions permettraient de favoriser le développement des matériaux et technologies d'assemblage pour l'allègement :

- promouvoir le transfert et l'industrialisation par la réalisation de plateformes de validation ou d'actions pilotes ;
- favoriser la diffusion technologique du secteur aéronautique vers le secteur automobile ;
- développer des filières de recyclage adaptées aux nouveaux matériaux.

## Liens avec d'autres technologies clés

1

7

11

69

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 69. Outils et méthodes de conception et de validation

### Description

Les méthodologies et outils de conception des composants et systèmes sont des clés de la compétitivité : ils permettent une conception de plus en plus rapide et de moins en moins chère, sans dégrader les conditions d'application des systèmes ainsi conçus.

#### Ingénierie système :

- permettre la co-conception des systèmes entre acteurs de différents niveaux dans la chaîne de valeur ;
- faciliter la gestion et la prise en compte des exigences, point clé de l'ingénierie système dans sa phase de conception. Cela implique une traçabilité rigoureuse jusqu'à la validation des systèmes ;
- prendre en compte les différents niveaux d'analyse qui permettent de qualifier un système industriel : Amdec, analyse de la valeur... ;
- intégrer les dimensions d'éco conception (voir fiche dédiée) ;
- dans le logiciel – embarqué notamment – l'outil de conception prend en charge l'encodage dans le référentiel choisi (encodeurs automatiques Simulink-Autosar...) ;
- l'analyse et la prédiction de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement sont des enjeux pour les systèmes complexes pour lesquels elles sont critiques.

#### Modélisation et simulation :

- la modélisation des systèmes est clé pour le test fonctionnel et la prise en compte des exigences lors de la conception : méthodes formelles, langages descriptifs spécifiques (SysML)... ;
- la simulation s'attache, elle, à évaluer numériquement le comportement physique du système. L'usine numérique, qui vise à simuler le fonctionnement complet de la chaîne de production entre dans cette catégorie.

Pour ces deux éléments, on peut véritablement parler de prototypage numérique.

#### Évaluation et validation :

- la vérification fonctionnelle des systèmes met en œuvre des technologies logicielles et « hardware-in-the-loop » ;
- l'évaluation du cycle de vie, tant du point de vue de ses impacts organisationnels et environnementaux (analyse de cycle de vie) que du point de vue économie (*lifecycle cost planning*) font partie intégrante des processus.

Ces outils rencontrent des verrous techniques et économiques :

- adaptation des outils aux usages : les PME ont besoin d'outils spécialisés sur leur métier ;
- le modèle de vente doit être adapté aux besoins et ressources des acteurs. Des modes de vente en SaaS ou en location apparaissent ainsi comme une des voies de diffusion de ces pratiques ;



- l'interopérabilité des outils logiciels doit être garantie aux industriels pour permettre la diffusion de leur usage. Elle concerne les modèles physiques, les exigences et spécifications, etc. ;
- prise en compte des standards de conception et évolutivité : les méthodes de conception doivent être conformes aux standards industriels, et évolutives pour permettre la prise en compte des nouveaux standards.

### Applications

Les outils de conception et de validation trouvent leur place à tous les niveaux de la chaîne de valeur de la fabrication des véhicules et de la mise en œuvre des systèmes de transport. Tous les modes ne sont pas aussi avancés dans le déploiement de ces types d'outils vers les équipementiers de rang 2 ou plus.

Le monde aéronautique est précurseur, avec la défense et le nucléaire, sur la mise au point et le déploiement des méthodes et outils d'ingénierie système. Le ferroviaire et le naval suivent. L'automobile a fait sa révolution au niveau des constructeurs, mais le déploiement vers les équipementiers de rang 1, s'il est amorcé, n'est pas complet.

### Enjeux et impacts

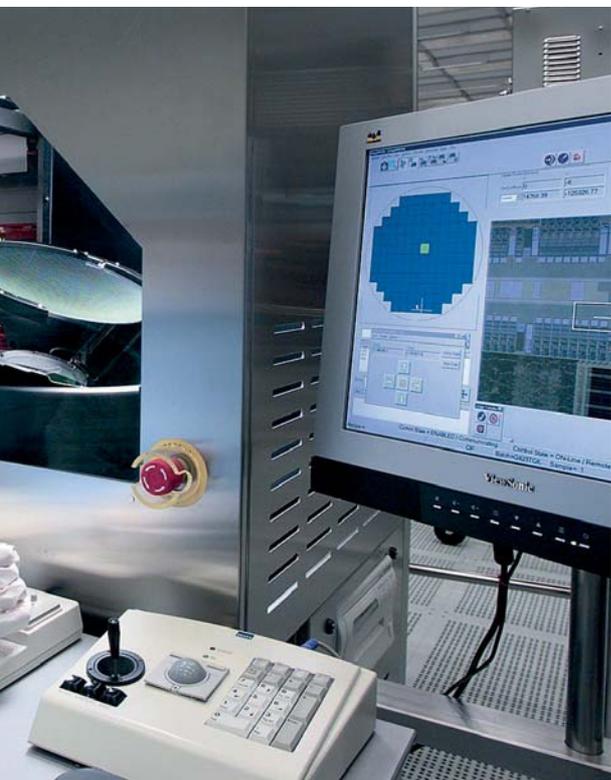
L'écosystème industriel du domaine des transports fait

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<span style="color: red;">●</span> Faible diffusion
<span style="color: grey;">●</span> Diffusion croissante
<span style="color: grey;">●</span> Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<span style="color: red;">●</span> Faible diffusion
<span style="color: grey;">●</span> Diffusion croissante
<span style="color: grey;">●</span> Généralisation



face à une concurrence forte des pays à moindre coût de main d'œuvre, non plus seulement sur la production, mais également sur la conception. Dans ce contexte, la maîtrise des aspects haut niveau de la conception à des coûts de développement concurrentiels, en parallèle de délais de conception de plus en plus courts, imposent de concevoir plus vite, de manière plus fiable, de réduire les délais et les coûts de validation en plus de garder la maîtrise française et européenne des technologies majeures. L'enjeu autour de cette question est le maintien de l'emploi en R&D des grands groupes européens, mais également la montée en compétence des PME qui, en développant une offre à plus forte valeur ajoutée, résisteront mieux à leurs concurrents internationaux.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- Dassault systemes, CEA, Renault, EADS, Airbus, CPC Premium, Areva, Dassault Aviation, Nexter, Thales, RATP, Altran, DCNS, Aneo...
- System@tic Paris-Région, Association Française d'Ingénierie Système (Afis), Incose, Insa Toulouse, INRIA, École Polytechnique, GDR MACS, INPL (Nancy), Ensta, Cnam, Nov@log...

## Position de la France

L'ingénierie système pose deux types de problèmes. Le premier concerne le contenu technique et les méthodes. Sur ce plan, la France est dans le peloton de tête des pays développeurs, avec notamment un leader international sur les outils et des acteurs industriels leaders qui développent leurs méthodes.

Le second concerne la diffusion à un écosystème large des pratiques. La position relative de la France en la matière est difficile à estimer, mais il est crucial aujourd'hui de renforcer cette compétence, notamment au sein des PME, avec le juste niveau de complexité adapté aux métiers de l'entreprise.

## Analyse AFOM

### Atouts

Des acteurs de forte compétence, voire de premier plan international.

Question prise en compte de manière forte dans les projets de pôles de compétitivité impliqués dans les transports.

Quelques PME innovantes.

### Faiblesses

Difficultés à diffuser les pratiques par manque d'outils adaptés aux PME.

Faiblesse de l'offre de formation ou de compétences.

### Opportunités

Développement de la co-conception.

### Menaces

Perte de marché des entreprises au profit des pays émergents.

## Recommandations

La diffusion de ces pratiques et de ces outils se heurte aujourd'hui à un obstacle patent qui est le manque de personnels et étudiants formés. Une étude commanditée par le pôle System@tic en 2008 estimait à 12 000 le nombre de spécialistes « systèmes » à recruter dans l'industrie à un horizon de cinq ans, avec un déficit avéré de profils en réponse à la demande industrielle. Le besoin en formation, la plus appliquée possible, est aujourd'hui posé.

La promotion de formats de données normalisés faciliterait l'interopérabilité des systèmes. La généralisation de l'utilisation des outils logiciels à l'usage, peu diffusée aujourd'hui, assortie d'un accompagnement en compétences, est un facteur favorisant de la diffusion de leur utilisation dans l'ensemble de l'écosystème.

## Liens avec d'autres technologies clés

19	26	40
58	59	61
62	65	67

### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## BIBLIOGRAPHIE

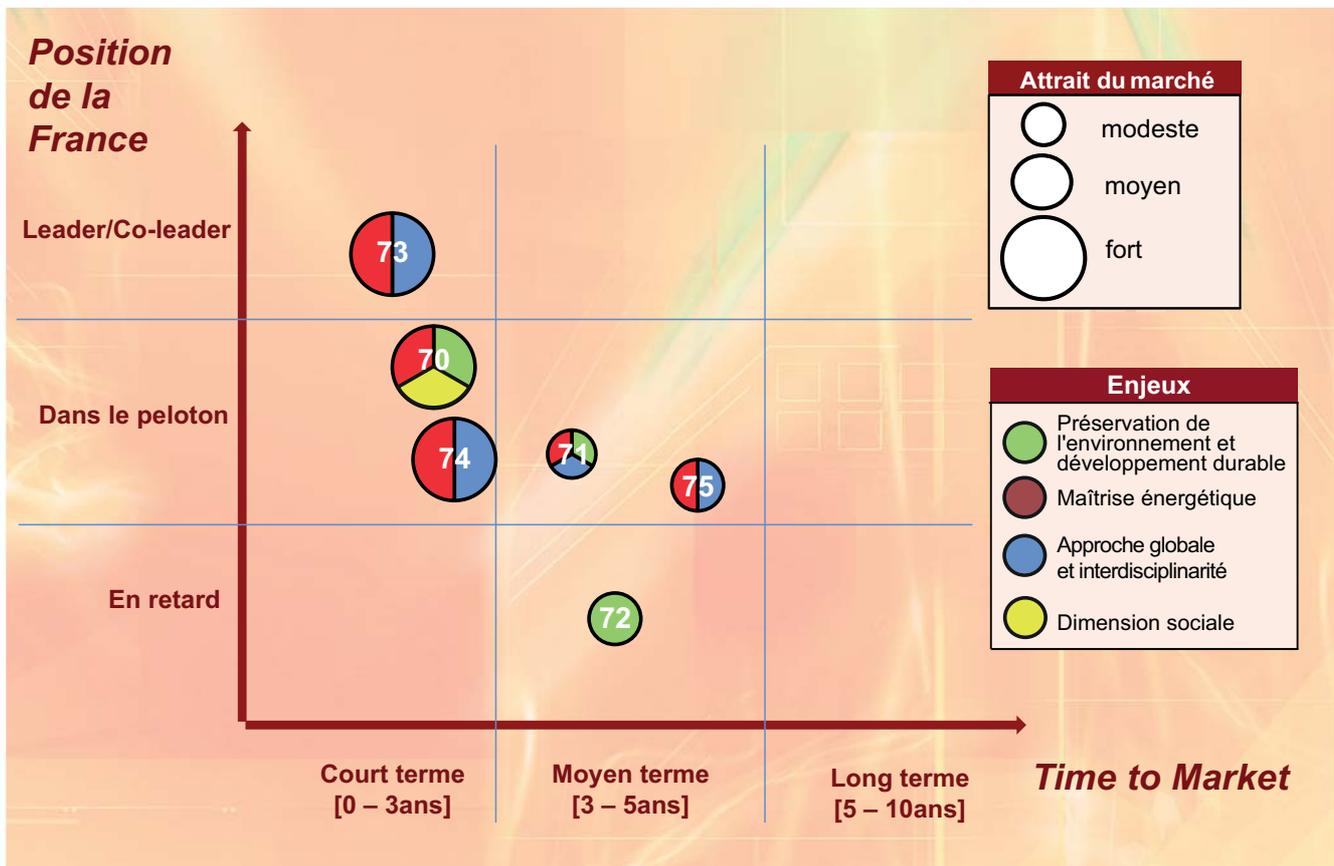
- [5.1] Présentation de la Commission européenne : *Comment expliquer ce qu'est la technologie*, 2005. ftp.cordis.europa.eu
  - [5.2] International Transport Forum : *Key Transport Statistics 2008*, OCDE, 2008, <http://www.internationaltransportforum.org/>
  - [5.3] *Un avenir durable pour les transports*, Commission Européenne, juin 2009
  - [5.4] *Programme de travail 2008-2012* du Predit 4, Predit, 2009
  - [5.5] *Synthèse sectorielle Transports*, Oséo, Avril 2010
  - [5.6] *Chiffres clés du transport*, Édition 2010, MEEDDM, Collection Repères
  - [5.7] *2009 EU Industrial R&D Investment Scoreboard*, Commission européenne, Joint Research Center, Novembre 2009
  - [5.8] Étude « Filières vertes », MEEDDM, Octobre 2009
  - [5.9] *European business: facts and figures*, 2009 edition, Eurostat, 2009
  - [5.10] *Transport outlook 2009 : Globalisation, Transport and Crisis*, OCDE/International Transport Forum Joint Transport research Centre, Discussion paper N° 2009-12, Mai 2009
- Transport routier**
- [5.11] *Stratégie de déploiement des infrastructures de recharge en France*, Dossier de presse de Luc Chatel, 17 février 2009
  - [5.12] *Ertrac Road transport scenario 2030+*, « Road to implementation », Ertrac, 2009
  - [5.13] *Accelerating toward 2020 – An automotive industry transformed*, Deloitte, Septembre 2009
  - [5.14] *Eucar : The Automotive Industry Focus on future R&D Challenges* ; novembre 2009
  - [5.15] *Eucar : The Electrification of the Vehicle and the Urban Transport System* ; juillet 2009
  - [5.16] *US Department of Energy : R&D Opportunities for Heavy Truck* ; juin 2009
  - [5.17] *Livre blanc pour le PREDIT 4, GO2 : Qualité et sécurité des systèmes de transport*
  - [5.18] *LUTB 2015 : cartographie des projets de recherche*
  - [5.19] *Mutations économiques dans le domaine automobile*, Pipame, avril 2010
  - [5.20] *Rapport de synthèse Motorisation propre*, Plateforme filière automobile, 2010
  - [5.21] *10 % des emplois dans l'automobile : un chiffre trompeur*, Sylvain Barde, Clair & Net, OFCE, février 2009
  - [5.22] *La congestion du boulevard périphérique parisien : estimation, évolution 2000-2007, discussions*, Martin Konning, Centre d'économie de la Sorbonne (Matisse), Janvier 2009
  - [5.23] *L'accidentalité routière en France : une année 2009 de contraste et un début 2010 encourageant*, MEEDDM, 2010
- [5.24] *Lotus Engineering - An Assessment of Mass Reduction, Opportunities for a 2017 – 2020 Model Year Vehicle Program*, mars 2010
  - [5.25] *Feuille de route véhicules routiers à faibles émissions des GES*, Ademe, Juin 2009
- Transport ferroviaire**
- [5.26] *Fédération des industries ferroviaires : Brochure*, www.ff.asso.fr
  - [5.27] *First annual draft of the ERRAC roadmaps*, Errac, Septembre 2010
  - [5.28] *Strategic rail research agenda 2020*, Errac, 2007
- Transport maritime et fluvial**
- [5.29] *WaterBorne - Vision 2020* ; 2006
  - [5.30] *WaterBorne - Strategic Research Agenda* ; 2006
  - [5.31] *Grenelle de la mer, groupe Navire du futur, rapport d'étape* janvier 2010
  - [5.32] *Les chiffres clés du Nautisme 2007-2008*, Fédération des industries du nautisme
- Aéronautique et espace**
- [5.33] *Acare : Addendum to the Strategic Research Agenda* ; 2008
  - [5.34] *Acare : European Aeronautics - A Vision for 2020* ; janvier 2001
  - [5.35] *Pipame-DGCIS Étude de la chaîne de valeur dans l'industrie aéronautique* ; septembre 2009
  - [5.36] *Gifas : Présentation de l'industrie française aéronautique, spatiale, d'électronique de défense et de sécurité* ; février 2010
  - [5.37] *Bilan annuel 2009* du Gifas, Jean-Paul Herteman, président
  - [5.38] *Aerostrategy 2009 : The attractiveness of the aeronautics MRO market and its segmentation*
  - [5.39] *Corac – Grand emprunt, programme de démonstrateurs*, mai 2010
- Industries support**
- [5.40] *IFP : Quelles énergies dans les transports de demain ?* novembre 2006
  - [5.41] *World Energy Council : Transport Technologies and Policy Scenarios to 2050* ; 2007
  - [5.42] *Global Commerce Initiative / Capgemini : Future Supply Chain 2016* ; mai 2008
  - [5.43] *PWC : Transportation & Logistics 2030* ; octobre 2009
  - [5.44] *MEEDDM DRAST : Prospective Fret 2030* ; juillet 2008
  - [5.45] *Pipame-DGCIS-DGITM Logistique et distribution urbaine* ; novembre 2009
  - [5.46] *IFP : Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients*, décembre 2008
  - [5.47] *Artema - Rapport annuel 2009*

# Bâtiment



# Bâtiment

- 70. Systèmes d'enveloppe du bâtiment
- 71. Systèmes constructifs
- 72. Matériaux biosourcés, composites et recyclés
- 73. Maquette numérique
- 74. Comptage intelligent
- 75. Technologies d'intégration et de mutualisation des ENR dans le bâtiment



## Contexte et enjeux

### Le secteur économique du bâtiment

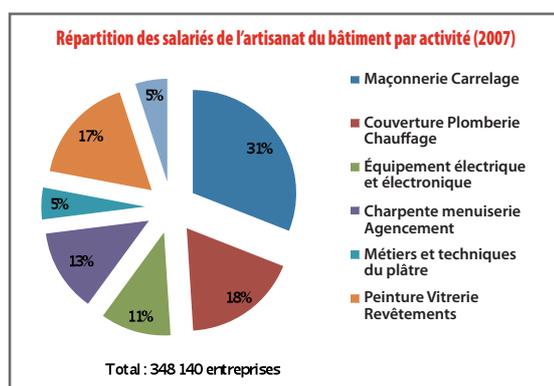
Le secteur français du bâtiment est un secteur économique de première importance : il emploie 1,5 million de salariés [1] au sein de 371 200 entreprises, dont 98 % d'entreprises de moins de 21 salariés (362 193 entreprises), ces dernières employant 67 % des effectifs du bâtiment [2].

Le marché s'est contracté depuis 2008 du fait de la crise économique, passant de 136,1 Md€ constants en 2008 à 127,1 Md€ (soit - 7 %). Néanmoins, et en dépit d'une année 2009 particulièrement difficile, l'emploi s'est considérablement développé depuis le début des années 2000, avec la création nette de 115 000 emplois pour les entreprises de moins de 20 salariés. Autre élément d'importance : d'après la Capéb, 60 000 embauches annuelles seront nécessaires pour faire face aux départs en retraite.

Le secteur est atomisé et les entreprises de moins de 20 salariés réalisent une part importante du chiffre d'affaires du bâtiment : 78,5 Md€, soit 62 % en 2009 [3], comme indiqué dans le tableau suivant.

Tranches d'effectifs	Chiffre d'affaires 2009 (en Mds€ constants 2007)	Répartition
Entreprises de 0 à 10 salariés	61,0	48%
Entreprises de 11 à 20 salariés	17,5	14%
Entreprises de moins de 21 salariés	78,5	62%
Entreprises de 21 salariés et plus	48,6	38%
<b>TOTAL Bâtiment</b>	<b>127,1</b>	<b>100%</b>

Le bâtiment représente une large palette de secteurs d'activités hétérogènes : le gros œuvre (93 539 entreprises), le second œuvre (147 991 entreprises) et les équipements techniques et électriques (106 610 entreprises). Pour étayer ce propos, le schéma suivant indique la répartition des salariés de l'artisanat du bâtiment par activité [4].



Le marché du bâtiment est composé de la construction neuve et de la rénovation (également appelé entretien - amélioration).  
 • Le marché de la construction neuve a particulièrement souffert du contexte de crise : il représente 326 089 logements et 30 155

constructions en non résidentiel (chiffres déclarés commencés en septembre 2009), soit respectivement - 21 % et - 20 % que sur la même période un an auparavant. La France n'est pas seule concernée par le recul du marché de la construction immobilière, en particulier la construction de logements, qui a conduit à une baisse du volume européen de la construction de plus de 8 %.  
 • Le marché de la rénovation représente près de la moitié du chiffre d'affaires global du secteur (48 % de l'ensemble de la production bâtiment) pour un volume de plus de 60 Md€ en 2007<sup>1</sup>, les entreprises de moins de 20 salariés réalisant pour leur part 55 % de leur chiffre d'affaires dans l'entretien - amélioration [5].

### Les fournisseurs de la construction

Les fournisseurs de la construction ne doivent pas être occultés puisque les contraintes environnementales et les économies d'énergie constituent des incitations à l'innovation les conduisant à améliorer les produits et procédés de fabrication correspondants. Du sol à la toiture, en passant par les vitrages, les matériaux évoluent en effet pour répondre à une attente des consommateurs et pour se mettre en conformité avec les nouvelles réglementations.

Ils rassemblent en France environ 11 000 entreprises du gros œuvre et du second œuvre, dont 80 % d'entreprises de moins de 20 salariés, et emploient plus de 300 000 salariés pour un chiffre d'affaires global de 54 Md€ (données 2005). La répartition d'entreprises entre gros œuvre et second œuvre est équilibrée, mais le second œuvre rassemble près de deux tiers des emplois [6].

		Nombre	Effectif employé	Chiffre d'affaires HT (M€)
<b>Entreprises de plus de 20 salariés</b>	Gros œuvre	1 167	83 893	17 873
	Second œuvre	1 046	172 208	30 071
	<b>Total</b>	<b>2 213</b>	<b>256 101</b>	<b>47 944</b>
<b>Entreprises de moins de 20 salariés</b>	Gros œuvre	4 266	24 270	3 332
	Second œuvre	4 638	26 320	3 233
	<b>Total</b>	<b>8 904</b>	<b>50 590</b>	<b>6 566</b>
<b>TOTAL</b>		<b>11 117</b>	<b>306 691</b>	<b>54 510</b>

L'offre des fournisseurs français est très variée et comprend des matériaux et produits de nature et de fabrication très différentes : du béton aux ascenseurs, en passant par tous les types de menuiseries. En 2005, les produits destinés au gros œuvre représentaient 40 % des facturations dont près de 70 % consacrés à la filière béton. Dans le cadre du second œuvre, les travaux d'installation absorbent près du tiers des facturations correspondantes, avec une part importante pour les matériels électriques. Le marché dépend très fortement de l'activité de construction, qui, après plusieurs années de tonicité marquée (en termes de facturations, la production des fournisseurs de la construction a progressé de 18 % entre 2000 et 2005), connaît une période difficile.

(1) Hors travaux de bricolage conduits directement par les ménages.

	Nombre (millions de logements)	Surface (millions de m <sup>2</sup> habitables ou utiles)	Consommations Électricité (TWh)	Consommation Gaz (TWh)	Consommations autres	Total consommation	%
Maisons individuelles	17,3	1 782	94,7	96,0	95,0	285,7	43,3
Immeubles collectifs	13,4	884	43,5	81,8	26,8	152,1	23,1
Total résidences	30,7	2666	138,2	177,8	121,8	437,8	66,4
Total bâtiments tertiaires		850	90,0	72,3	58,9	221,2	33,6
<b>TOTAL</b>		<b>3 516</b>	<b>228,2</b>	<b>250,1</b>	<b>180,7</b>	<b>659</b>	<b>100</b>

## Le poids du bâtiment dans la consommation énergétique et du point de vue environnemental

Le bâtiment représente près de la moitié de la consommation en énergie finale et près du quart des émissions de CO<sub>2</sub>. Malgré une baisse de la consommation unitaire, la consommation d'énergie des bâtiments a augmenté de 30 % au cours des trente dernières années (avant de décroître depuis 2001) du fait de l'accroissement du parc des bâtiments, de la surface moyenne des logements, de l'augmentation du confort et de l'apparition de nouveaux usages contribuant à l'augmentation forte de la consommation d'électricité.

Depuis 1990, le bâtiment et les transports représentent les deux seuls secteurs qui ont vu la part de leurs émissions de CO<sub>2</sub> augmenter de 21 % et 17 % respectivement [7]. Pendant la même période, la part des émissions de CO<sub>2</sub> de l'industrie diminuait de 21 % et celle de l'agriculture de 6 %. Le parc immobilier résidentiel et tertiaire produit un quart des émissions de CO<sub>2</sub>, soit la troisième source d'émissions. Il consomme 40 % des consommations énergétiques globales, soit 660 TWh, la consommation moyenne annuelle d'énergie du secteur étant de l'ordre de 240 kWh/m<sup>2</sup> d'énergie primaire par m<sup>2</sup> et par an. Deux grands types de bâtiments sont à considérer car il s'agit d'associer à chaque cible une stratégie adaptée dans un souci d'efficacité et de lisibilité. L'énergie est consommée pour les deux tiers dans les logements et pour un tiers dans les bâtiments tertiaires. La part des émissions de CO<sub>2</sub> suit une répartition identique. Les données suivantes précisent les données clés pour chacun des deux secteurs et permettent notamment de comprendre l'importance de la rénovation [8].

- Les bâtiments résidentiels représentent 30,7 millions de logements (dont 4,5 millions de logements sociaux), plus de 2,666 Md€ de m<sup>2</sup> utiles ou habitables [9] (1,782 Md€ de m<sup>2</sup> pour les maisons individuelles et 0,884 Md€ de m<sup>2</sup> pour les immeubles collectifs), 28 % des consommations d'énergie finale et 12 % des émissions de CO<sub>2</sub>. Compte tenu du taux de renouvellement du parc, la rénovation des 19 millions de logements construits en France avant la première réglementation thermique (RT) de 1975 est cruciale (57 % du parc et plus de 75 % de la consommation d'énergie du secteur).

- Les bâtiments tertiaires représentent 0,850 Md€ de m<sup>2</sup> et 25 à 30 % de la consommation finale d'énergie du secteur. Il s'agit d'un secteur complexe et hétérogène aux problématiques multiples liées aux types de bâtiments, à la nature de l'activité, à leur usage, etc. Les branches les plus consommatrices d'énergies sont les bureaux (25 % de la consommation d'énergie totale), les commerces (23 %), les écoles (13 %), les hôpitaux (12 %) et les cafés, hôtels et restaurants (10 %).

Le tableau ci-dessus résume les consommations énergétiques finales par usage [9].

## L'évolution du cadre réglementaire et des exigences de performance environnementale

Le Grenelle de l'environnement a consacré le rôle clé au secteur du bâtiment en étoffant considérablement le cadre réglementaire autour des normes bâtiment basse consommation (BBC - 2012) et bâtiment à énergie positive (Bepos - 2020) dans la perspective d'une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre.

Le Grenelle 1 a fixé des objectifs très ambitieux pour le bâtiment existant : - 12 %, soit une consommation énergétique moyenne de 210 kWh/m<sup>2</sup>/an, à horizon 2012, - 38 %, soit une consommation énergétique moyenne de 150 kWh/m<sup>2</sup>/an, d'ici 2020 et - 70 à - 80 %, soit une consommation énergétique moyenne de 50 à 80 kWh/m<sup>2</sup>/an, d'ici à 2050.

Cela revient à un objectif de 400 000 logements à rénover par an à compter de 2013, 800 000 logements sociaux d'ici à 2020 et à assurer la rénovation énergétique de l'ensemble des bâtiments de l'État et de ses établissements publics avant fin 2012. Concernant spécifiquement la rénovation du parc existant et dans l'hypothèse où l'objectif de 400 000 logements par an sera atteint, le marché de la rénovation énergétique des logements s'élèverait à 16 Md€ par an à horizon 2020<sup>3</sup> et même à 24 Md€ en ajoutant les équipements de chauffage mobilisant les énergies renouvelables installées (chaudières à condensation, pompes à chaleur, chaudières individuelles au bois et solaire thermique). Le développement de la filière bénéficierait aux entreprises du bâtiment (artisans et PME) avec la création anticipée de 90 000 emplois à horizon 2020, ainsi qu'aux entreprises de production

(2) L'énergie primaire représente l'énergie nécessaire pour extraire, distribuer, stocker et produire l'énergie mise à disposition chez le consommateur. Dans le cas de l'énergie électrique, le kWh primaire amené par le réseau est égal à 2,58 fois le kWh final, énergie mesurée au compteur de l'abonné.

(3) En France, le marché de la rénovation des logements avec des solutions performantes s'élève à 7 Md€ par an en 2007 en incluant les ventes de matériels et de services d'installation.

et d'installation d'équipements performants avec la création potentielle de 60 000 emplois. Le marché des services de gestion de la performance énergétique s'élèverait à 6 Md€ en 2020 avec la création de plusieurs milliers d'emplois [8, 10]. L'isolation extérieure, intérieure, la couverture et les finitions seront clés, la suppression totale des ponts thermiques, l'étanchéité à l'air et la maîtrise des techniques de pose étant à atteindre à court terme. La rénovation thermique des bâtiments implique donc de nombreux corps de métiers autour de la notion d'enveloppe du bâtiment. L'isolation des combles, ainsi que l'étanchéité des toitures, constituent également des axes clés de rénovation. Ces objectifs sont d'autant plus ambitieux qu'ils s'inscrivent dans un contexte d'augmentation des prix de l'énergie et des charges induites pour les entreprises et les ménages, l'efficacité énergétique devant pourtant constituer une option économique attractive pour les consommateurs [7]. Il s'agit alors de fournir des équipements à un coût abordable ou maîtrisé au regard de la demande.

Le Grenelle 2 décline, pour sa part, chantier par chantier, secteur par secteur, les objectifs entérinés par le premier volet législatif du Grenelle de l'environnement. Ce texte d'application et de territorialisation du Grenelle permet ainsi de mettre en œuvre d'une part, la rupture technologique dans le neuf et d'autre part, la rénovation thermique accélérée du parc ancien. Concernant le bâtiment, il s'engage à l'amélioration énergétique des bâtiments et à l'harmonisation des outils de planification. Pour cela, il précise qu'il sera nécessaire de favoriser un urbanisme économe en ressources foncières et énergétiques, mieux articulé avec les politiques d'habitat, de développement commercial et de transports tout en améliorant la qualité de vie des habitants, notamment à travers le renforcement du code de l'urbanisme, la généralisation des schémas de cohérence territoriale (SCOT) et la réforme de la réglementation de l'affichage publicitaire.

## Les grandes tendances d'évolution du secteur

### Grandes tendances et enjeux globaux

L'évolution souhaitée ne se fera qu'à la condition de développer une filière industrielle capable d'évoluer vers l'intégration de l'éco-conception et de l'« énergie grise » tant sous la dimension du KW, que sur celle du CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire dans le sens d'une approche globale basée sur l'intégration de l'ensemble des corps de métier au moment de la conception, sur l'émergence d'une culture du résultat et non plus uniquement de moyens, sur l'incitation à l'utilisation de technologies et de services de gestion active des équipements et sur l'industrialisation de la filière des installateurs-diagnostiqueurs. Selon la définition de l'Ademe, « l'éco-conception consiste à intégrer l'environnement dès la phase de conception des produits, qu'il s'agisse de biens, de services ». Elle nécessitera que la production des déchets soit prise en compte dès la conception des produits, comme les méthodes de construction pour en favoriser de manière effec-

tive le recyclage. Le bâtiment n'est actuellement pas un acteur majeur de la valorisation des déchets, un effort important au niveau des techniques de recyclage restant encore à effectuer en amont de leur diffusion. Il s'agit donc également d'un enjeu transversal aux technologies clés puisque l'ensemble des produits du bâtiment est concerné. De plus, il est nécessaire que l'utilisation de matériaux de réemploi, contenant des éléments recyclés ou renouvelables soit favorisée. Dans cette optique, il s'agit de mettre en place une vraie politique de gestion des ressources au niveau local.

Dans ce contexte à forts enjeux, les contrats de performance énergétique (CPE) et la mise en place de bouquets de travaux joueront un rôle clé. L'un des premiers enjeux clés du bâtiment est de développer une gamme performante de services autour d'offres globales, fondées sur l'assemblage de techniques et de technologies visant à satisfaire de manière cohérente l'amélioration énergétique et environnementale des bâtiments, ainsi que le respect de leurs spécificités et usages. De tels bouquets de travaux doivent être déclinés en fonction des objectifs attendus et des différentes réglementations à venir. Ils devront être fondés sur un assemblage raisonné de techniques concourant à satisfaire de manière cohérente l'amélioration énergétique et le respect des spécificités du bâtiment, telles que les aspects d'accessibilité, d'usages et de santé-environnement (émission de substances nocives pour la santé, telles que les CMR<sup>4</sup>, les COV<sup>5</sup>, etc.).

De tels bouquets doivent s'appuyer sur une amélioration globale des façons de faire. Cette évolution devra se dérouler dans le sens de l'interopérabilité ou du décloisonnement des corps de métiers permettant de connaître les points de vigilance des autres (approche interdisciplinaire).

Les formations, tant initiales que continues, devront évoluer, leurs référentiels, ainsi que le tissu de formateurs les prodiguant. C'est une condition *sine qua non* de la mobilisation de l'ensemble des professionnels ; 225 000 personnes devront être formées chaque année pendant dix ans pour atteindre les objectifs du Grenelle, notamment ceux portant sur la rénovation. Le défi est donc à la fois quantitatif (augmentation du nombre de professionnels à former et renforcement de la formation continue pour les professionnels déjà en activité) et qualitatif (formation des professionnels sur des techniques, technologies ou équipements innovants ; développement de l'interopérabilité) pour aider l'ensemble des entreprises à renforcer collectivement leur visibilité et capacité à répondre à la nouvelle demande à venir.

(4) Substances chimiques à caractère Cancérogènes, Mutagènes ou toxiques pour la Reproduction.

(5) Composés Organiques Volatiles.

## Produits et services qui permettront de répondre aux enjeux 2015-2020

### Commercialisation d'offres de bouquets de travaux gérant l'interface bâti-équipements-usages

Les professionnels du secteur doivent encourager la réalisation de bouquets de travaux conduisant statistiquement à une amélioration de la performance énergétique : les bouquets de travaux sont composés des opérations à meilleurs rendements énergétiques et à meilleurs retours sur investissements. Ils combinent de manière raisonnée différentes solutions, par exemple, le remplacement des fenêtres avec l'isolation des parois et de la toiture, l'installation d'équipements d'énergies renouvelables, etc.

En rénovation du tertiaire et du collectif résidentiel, le besoin en isolation doit être systématiquement évalué. Dans le but de parvenir à la suppression des ponts thermiques, les professionnels doivent évoluer vers une parfaite maîtrise. L'isolation thermique intérieure doit donc se baser sur une très bonne connaissance des matériaux et de leurs poses, notamment pour les matériaux d'isolation répartie, tels que les briques à alvéoles (briques monomur), les briques cellulaires, ou encore les matériaux d'origine renouvelable. De même, la mise en œuvre de l'isolation thermique par l'extérieur doit être généralisée à l'ensemble des maçons, menuisiers et plâtriers à court terme.

### Services de gestion active de la performance énergétique

Une rupture technologique des solutions de gestion active des équipements et des services existants est souhaitée. Sont concernés les équipements à haut rendement (appareils électroménagers performants, lampes et luminaires à haut rendement, moteurs à haut rendement, câbles à section adaptée pour limiter les déperditions d'énergie, etc.), les équipements de régulation (régulation et pilotage des systèmes de chauffage et de climatisation, système de gestion de l'éclairage (gradation, détection de présence, variateurs de vitesse, etc.) et les services d'optimisation de la consommation énergétique<sup>6</sup>.

Les services d'optimisation de la consommation énergétique reposent sur l'établissement de contrats de performance énergétique, les actions diagnostic de la performance énergétique initiale et celles de mise en place d'actions d'amélioration. Les contrats de performance énergétique sont cruciaux car ils permettent de garantir la réalisation des économies d'énergie affichées en matérialisant les potentiels de gains par la gestion active. L'amélioration de l'efficacité énergétique doit être en effet vérifiable et mesurable (ou estimable). Le prestataire doit fournir une garantie de résultats et mettre en œuvre les moyens lui permettant de s'engager par contrat pour atteindre durablement les objectifs de qualité et d'amélioration annoncés et contrôler et mesurer la performance.

### Opérations de diagnostic et de suivi (commissionnement) du bâti existant

Le diagnostic, le suivi et l'évaluation sont des fonctions clés à

renforcer, du fait de leur rôle central dans l'amélioration des pratiques de la filière. Le prestataire du contrat de performance doit être l'interlocuteur unique et engagé sur des résultats contractualisés et quantifiables. Son principe est le suivant : il contractualise l'obligation de résultats autour d'une garantie de gain énergétique, définit les actions d'amélioration énergétique et assure l'exploitation dans la durée du bâtiment afin de pérenniser les gains, rentabiliser les actions d'amélioration énergétique et vérifier les performances selon une méthode de mesure et de calcul définie.

L'opérateur, par sa connaissance des bâtiments et sa présence régulière sur le terrain, est ainsi en mesure de diagnostiquer les actions d'amélioration, de contrôler la réalisation des travaux et de faire jouer les garanties dans les premiers mois suivants les travaux, de décider d'investissements complémentaires au regard des contraintes économiques et de maximiser l'impact des actions d'amélioration énergétique par sa bonne gestion. L'ensemble de la filière est à mobiliser, à commencer par les maîtres d'ouvrage dont le rôle est déterminant, notamment pour les marchés publics. Leur sensibilisation pour la formalisation des cahiers des charges respectant les critères environnementaux et faisant la demande explicite d'une approche globale est nécessaire.

Le suivi (ou « commissionnement ») consiste à définir les procédures, assurer la réalisation des essais, vérifier et contrôler les équipements individuels et les systèmes, vérifier les performances, former les personnels d'exploitation et de maintenance. Cette fonction est d'autant plus importante que de nouveaux systèmes-concepts constructifs intégrant de nouveaux équipements et matériaux verront le jour.

### Matériaux biosourcés, composites et recyclés

#### • Les matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés sont issus de ressources végétales renouvelables qu'il s'agisse d'agro-ressources (chanvre, lin, bois, etc.), ou de matériaux issus du recyclage (ouate de cellulose, fibres de bois, etc.). Ils sont l'une des voies de valorisation de la biomasse et permettent de limiter l'appauvrissement des ressources fossiles. Leur incorporation, pour tout ou partie, à la place des matériaux d'origine pétrochimique ou minérale permet d'envisager une réduction des rejets de gaz à effet de serre. En plus d'adresser l'enjeu de renouvelabilité, ils permettent également d'adresser celui de la recyclabilité dans le cas de la réutilisation du matériau après récupération et traitement. Ils présentent un bon bilan écologique, une bonne stabilité et présentent l'avantage de s'inscrire dans un schéma de développement local ou régional.

L'utilisation de bois (en élément de bardage, de structure, ou d'aménagements intérieurs) et d'autres plantes annuelles, telles que le chanvre, le lin (en isolants) permet d'économiser les ressources si toutefois le renouvellement effectif des matériaux est assuré. Dans le cas du bois, les labels FSC (*Forest Stewardship Council*) et PEFC (*Pan European Forest Certification*) offrent une garantie sur la gestion durable des forêts. La provenance du matériau doit également faire l'objet d'une attention particulière. Ils peuvent être utilisés tant en construction neuve, en parti-

(6) Définition des services d'efficacité énergétique d'après le Club des services d'efficacité énergétique (CS2E).

culier pour le bois, qu'en rénovation. Le béton représente, dans un bâtiment classique, 50 à 75 % de la masse totale de tous les matériaux qui le composent alors qu'il ne représente qu'environ 10 % de la masse dans un bâtiment à ossature bois. La mission « Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois » confiée à Jean Puech, ancien ministre, et remise au président de la République en avril 2009, insiste particulièrement sur l'utilisation du bois au regard de la sous-exploitation et de l'expansion de la forêt française : elle s'accroît de 25 000 hectares par an et le volume moyen à l'hectare de bois sur pied a triplé. L'utilisation du bois dans le bâtiment serait de plus une source importante de création d'emplois. Si la filière bois emploie actuellement 231 000 salariés en zone rurale et près de 450 000 avec toute la filière bois, le fait de mobiliser 12 millions de m<sup>3</sup>, espérés d'ici à 2010, créerait environ 40 000 emplois supplémentaires dans les territoires ruraux (emplois non délocalisables) dont 14 000 pour l'exploitation forestière amont. La poursuite de cette mobilisation à 21 millions de m<sup>3</sup> d'ici à 2020 devrait doubler ce chiffre [10].

#### • Les matériaux recyclés

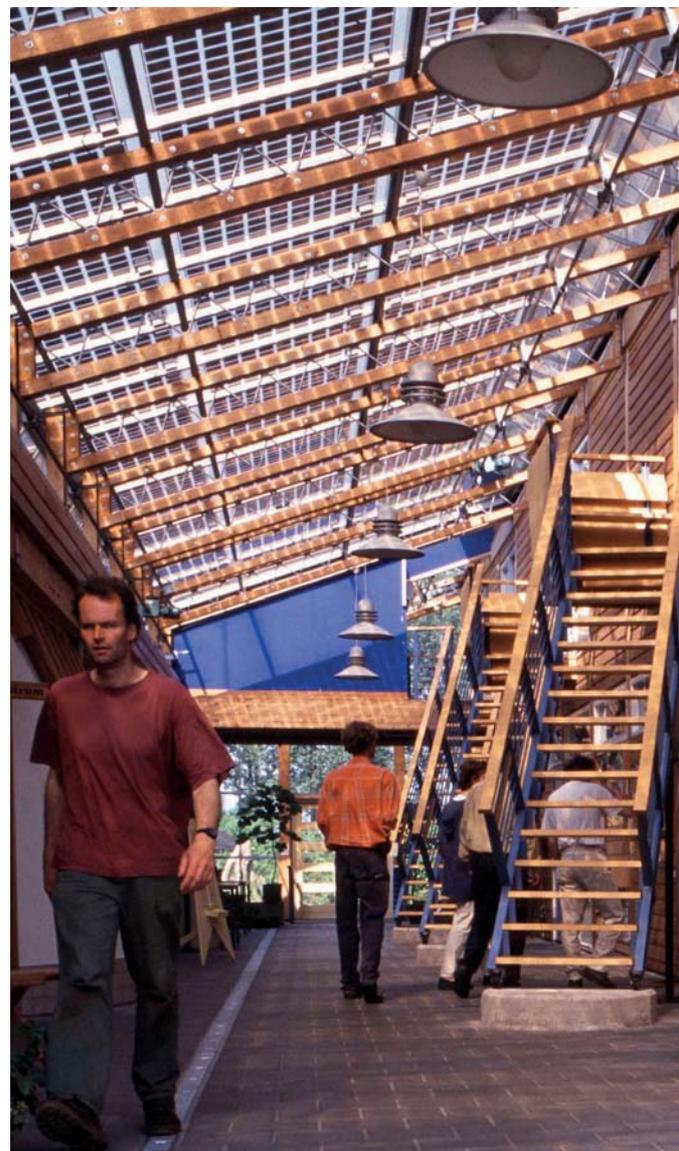
Certaines matières premières non renouvelables et parfois même rares (comme certaines essences de bois) sont utilisées de manière trop systématique dans la construction alors qu'il existe des solutions de remplacement. Il peut s'agir des déchets de construction et de démolition du bâtiment et du génie civil, mais aussi des déchets et des sous-produits issus d'autres secteurs industriels. L'objectif est de proposer des matériaux nouveaux, et non simplement des matériaux de récupération.

#### **Intégration des énergies renouvelables (ENR) dans le bâti existant et dans la construction**

L'essor des ENR est l'un des objectifs majeurs du Grenelle, le solaire thermique, les pompes à chaleur, la biomasse et le photovoltaïque étant les principales sources d'ENR afin d'atteindre ces objectifs. Il s'agit d'utiliser des outils, des méthodes ou des systèmes permettant d'intégrer des « composants ENR » pour la production d'électricité, pour le chauffage et la climatisation, ainsi que pour l'eau chaude sanitaire et d'utiliser les sources d'énergies renouvelables (vent, soleil, sol et biomasse). Les exigences sont multiples et ne concernent pas le seul aspect énergétique : multifonctionnalité, esthétique, facilité de mise en œuvre et de gestion, prise en compte des usages, coût, etc.

Les principales sources d'énergies renouvelables sont pour le bâtiment : le solaire thermique, le solaire photovoltaïque, la géothermie et le bois énergie. Les applications concernent principalement la production d'eau chaude (pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire) et la production d'électricité (pour un usage propre ou la revente sur le réseau). La production de chauffage, d'eau chaude ou d'électricité à partir d'énergies renouvelables, va de pair avec une utilisation rationnelle de l'énergie liée d'une part à la performance des enveloppes de bâtiments et d'autre part à la maîtrise de l'ensemble des énergies des bâtiments. Ces ENR peuvent être combinées, tant pour la construction neuve, pour laquelle l'intégration peut être prévue dès le stade de conception, que pour les opérations de rénovation.

Le solaire thermique est en forte croissance et constitue l'un



des principaux enjeux à l'horizon 2020. Les installations de systèmes solaires combinés (SSC) (chauffage et eau chaude sanitaire) étaient en 2007 en augmentation de 37 % par rapport à 2006 avec 5 500 systèmes installés et les chauffe-eau solaires individuels (CESI) en augmentation de 1 % avec 30 000 appareils installés. Avec 18,50 m<sup>2</sup> de capteurs solaires installés pour 1 000 habitants, et comparé à l'Allemagne qui en compte 104 m<sup>2</sup>/1 000 habitants, la France dispose d'un fort potentiel de développement. 4 millions de chauffe-eaux solaires devront être installés à l'horizon 2020. Les prix demeurent néanmoins élevés et en augmentation régulière, alors qu'une baisse des prix serait attendue suite au développement de cette filière.

Une rupture sur les équipements de chauffage et sur leur utilisation est nécessaire. L'utilisation de nouvelles solutions de chauffage efficaces (chaudières gaz à condensation, chaudières bois à haut rendement, pompes à chaleur air/eau et eau/eau, micro-génération bois, gaz) est souhaitée pour réduire de manière significative les consommations, ainsi que des solutions d'ap-



point pour l'eau chaude sanitaire : Cesi et SSC. Le marché est en croissance : 150 000 pompes à chaleur vendues en 2008 (deux fois plus qu'en 2007), 1,2 million de logements à équiper d'ici à 2012. Il nécessite néanmoins une montée en compétences des installateurs et devra reposer sur un dimensionnement plus cohérent des équipements.

Le photovoltaïque sera clé à échéance 2020 mais son essor semble encore limité pour les constructions individuelles, notamment en raison de son coût. De même, la géothermie tarde à se développer, les savoir-faire, notamment les techniques de forage profond, étant peu maîtrisés. La faisabilité de cette technologie nécessite une étude préalable des sols et le développement adéquat des compétences. Le micro-éolien peut constituer, dans quelques cas, une évolution intéressante pour la construction, même s'il participera pour une part moindre aux objectifs 2020 du Grenelle (d'après le comité opérationnel 1). Les problèmes de performance, de longévité des matériaux et de leur installation, urbaine notamment, freinent l'essor de cette technologie.

### Utilisation des TIC et de maquettes numériques dès la conception en construction neuve

Pour les bâtiments tertiaires ou résidentiels collectifs, la maquette numérique de conception, réalisation et exploitation devra être généralisée. Elle aura une triple fonction : simulation et formation aux nouveaux procédés et aux nouvelles techniques, collaboration en temps réel entre les professionnels lors du chantier, support de gestion technique durable du bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie. Une politique volontariste pourrait favoriser l'émergence d'une offre compétitive par l'industrie française des logiciels graphiques.

L'utilisation des TIC sera fondamentale en aval pour assurer une information et un suivi de l'utilisation dans le but d'en assurer une performance optimale. Le comportement des usagers peut en effet faire varier les consommations de 5 à 25 kWh/m<sup>2</sup>/an pour des logements passifs consommant 15 kWh/m<sup>2</sup>/an en théorie. L'affichage des consommations d'électricité, de gaz et d'eau de chaque habitation est un passage obligatoire pour s'assurer de la bonne utilisation des bâtiments et éviter un possible effet de rebond.

## Les tendances technologiques et les technologies clés

Les technologies capacitantes clés support sont les suivantes :

- les technologies permettant l'intégration des ENR dans une optique de mutualisation et de gestion active de la performance énergétique et environnementale ;
  - les technologies de comptage intelligent ;
  - la généralisation des outils de modélisation de la performance et des maquettes numériques ;
  - les systèmes d'enveloppe du bâtiment ;
  - l'intégration des matériaux biosourcés, composites et recyclés ;
  - les offres de systèmes constructifs (conception, organisation et gestion de la fabrication des produits utilisés dans le bâtiment).
- Les technologies capacitantes trouveront leur place dans les produits, *process* et services en assurant : un même niveau de certification pour les nouveaux matériaux (résoudre les problèmes de garantie décennale) et une formation continue des professionnels dans le but de proposer les services optimaux en termes de pose et de maintenance, tant sur les produits que services existants et nouveaux. L'objectif est d'autant plus important qu'il sera nécessaire de capitaliser très rapidement sur les premières expériences de démonstration et de réalisation et de ne pas « discréditer » les nouvelles offres pour en assurer une diffusion large et pérenne.



## Analyse de la position de la France

### Position de la France

Le bâtiment constitue plutôt une zone de force pour la France, notamment sur le plan industriel : la présence de grandes entreprises industrielles, de fournisseurs de solutions d'efficacité sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'efficacité énergétique (Saint-Gobain, Lafarge, Vicat pour les produits de construction, Dalkia et Cofely pour l'exploitation énergétique, Schneider et Legrand pour les équipements, Vinci, Bouygues et Eiffage pour le BTP, SPIE pour l'ingénierie de la mesure et le comptage intelligent), et d'un large tissu de PME (300 000 entreprises). La France dispose également d'une position solide sur le plan scientifique avec de nombreux laboratoires publics et privés et des acteurs tels que le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB). De nombreuses initiatives sont également à relever, dont la maison à énergie positive et celles au sein des pôles Advancity, Derbi (Développement des énergies renouvelables dans le bâtiment et l'industrie), Cap Digital, ou de pôles impliqués dans la valorisation de la biomasse non alimentaires, tels que Alsace Energivie, IAR (Industrie et Agro-Ressources), Pôle Fibres Grand Est, Xylofutur, etc.

Une dynamique forte d'autres initiatives de type clusters-centres de ressources-plateformes de ressources régionales est égale-

ment à citer : cluster éco-habitat en Poitou-Charentes, Ekopolis en Île-de-France, Envirobat Méditerranée en région Paca, Nobatek à Anglet, etc. D'autres régions, comme le Nord-Pas-de-Calais, ont créé une agence régionale de la création et de développement des éco-entreprises (CD2E) qui accompagne notamment les entreprises dans les démarches techniques de validation. Par ailleurs, les Grands ateliers de l'Isle-d'Abeau permettent de favoriser des synergies dans les domaines de l'art, de l'ingénierie et de l'architecture en regroupant des étudiants en architecture, des élèves ingénieurs et des étudiants d'art qui peuvent croiser leurs approches avec celles d'industriels et de professionnels. Néanmoins, et malgré une prise de conscience sur le territoire à travers les actions des collectivités et de regroupements d'artisans, un retard important vis-à-vis de pays plus avancés en matière de bâtiment à moindre impact environnemental, est à signaler. Les pays nordiques, ou encore l'Allemagne, font figure d'exemple. L'Allemagne a ainsi mis en place depuis une dizaine d'années des obligations réglementaires lors de la rénovation des logements pour accélérer la rénovation thermique des bâtiments anciens (réglementation EnEV depuis 2002), des actions de structuration de l'offre par des programmes pilotes (dans le cadre du projet pilote « *Niedrigenergiehaus im Bestand* » de l'Agence allemande de l'énergie) pour industrialiser les opérations et en limiter les coûts et une véritable culture du résultats (subventions octroyées en fonction de l'ambition des projets et des résultats atteints).

La conséquence est que s'il existe bien un secteur du bâtiment en France, la filière « efficacité énergétique du bâtiment » est plus diffuse et les offres en prestation globale (hors les majors du BTP) doivent être accrues. De même la notion de coût global par les maîtres d'ouvrages qui privilégient encore le moins-disant devrait être plus utilisée.

### Dispositif d'accompagnement

Le dispositif d'accompagnement est en place avec les réglementations thermiques (RT 2010 et RT 2020) fixant les objectifs à atteindre et définissant les actions :

- généralisation des logements neufs BBC dès 2012 (50 kWh (primaire)/m<sup>2</sup>/an) et transition vers les bâtiments passifs (Bepas) caractérisés par des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m<sup>2</sup>/an, ces derniers pouvant devenir à énergie positive (Bepos) en utilisant les énergies renouvelables d'ici à 2020 ;
- réalisation, d'ici à cinq ans, d'environ un tiers des bâtiments neufs BBC et, sur la période 2008-2012, d'au moins 25 % de logements BBC et 10 % de Bepas ou Bepos ;
- adoption en 2010 d'une nouvelle réglementation thermique (RT très haute performante énergétique THPE) et en 2015 de la RT bâtiment basse consommation (BBC) ;
- réduction de 12 % en 2012 de la consommation du parc ancien et de 38 % en 2020 ; passer d'une consommation de 240 kWh/m<sup>2</sup>/an à 210 kWh/m<sup>2</sup>/an en 2012 et 150 kWh/m<sup>2</sup>/an en 2020. Pour le tertiaire l'objectif est de 80 kWh/m<sup>2</sup>/an ;
- création des labels BBC rénovation et BBC compatible ;
- lancement d'un grand programme de formation profession-

nelle et d'un programme de recherche spécifique afin de réduire les coûts, appuyé par les fédérations professionnelles ;

• etc.

De nombreuses autres mesures ont été mises en œuvre pour soutenir les politiques définies en matière de développement des énergies renouvelables et d'amélioration de l'efficacité énergétique. Parmi elles : les labels de qualité dans les énergies renouvelables, les étiquettes énergie sur les équipements du foyer, le système du bonus malus écologique, la mise en place de financements spécifiques (tels que le livret développement durable), etc.

La combinaison des objectifs réglementaires issus du Grenelle de l'environnement et des aides accordées pour la rénovation énergétique des bâtiments devrait fortement dynamiser le marché. Le potentiel de croissance est important en cas de mise en œuvre massive de ces solutions à horizon 2020 (marché de 20 Md€ par an, 110 000 emplois nets et 82 TWh économisés annuellement).

## Freins à la diffusion des technologies capacitanes

### L'inertie du tissu de formation et le manque de lieux de démonstration et/ou de formation sur sites

Les professionnels du bâtiment doivent être les acteurs et vecteurs de conviction et les prescripteurs des consommateurs. Or, le niveau de compétences évolue trop lentement, d'où des cloisonnements encore importants entre corps de métiers, par exemple entre le monde des TIC et celui du bâtiment. Ces éléments sont des freins à l'usage de procédés innovants (intégration des ENR et de systèmes hybrides, intégration de produits d'origine renouvelable, etc.) et à la diffusion de la culture du résultat. Pour accélérer les mutations, il sera nécessaire de rapprocher la formation des professionnels des lieux de réalisation et de démonstration en capitalisant sur les formations existantes, en particulier celles du Feebat et Crepa.

Les métiers doivent intégrer une dimension de conseil, de prescription et de service d'optimisation de la consommation : évolution du métier de fournisseur vers celui garantissant un service ; pour l'énergie, évolution d'un métier de pose vers celui d'énergéticien. Il est nécessaire de développer une filière de thermiciens conseils avec des compétences multi-produits. Ils contribueront ainsi directement à l'adoption de matériaux et d'équipements performants en les mettant en « première ligne commerciale », en adaptant leur offre et leur discours et en pratiquant des prix attractifs.

Les interactions entre acteurs, métiers et compétences doivent être modifiées autour de plusieurs groupes de métiers : la conception-programmation (architectes et bureaux d'études), l'enveloppe (maçons, couvreurs, charpentiers, menuisiers, plaquistes, peintres), les équipements (chauffagistes, plombiers, électriciens, génie climatique) et les fournisseurs de matériaux et d'énergie (fournisseurs, fabricants industriels, fabricants artisanaux). Cette évolution passera par des plateformes de démonstration au sein de lieux communs d'apprentissage sur des techniques

clés (caméras thermiques, filtrométrie, équipements d'ENR) ainsi que des visites de chantiers démonstratifs mettant l'accent sur l'absence de ponts thermiques, l'étanchéité à l'air, le rationnel du choix des équipements et de leur dimensionnement, la pose optimale des freine-vapeurs et isolants en couche mince. De tels dispositifs permettront de passer du modèle traditionnel de responsabilisation par lot (ne permettant pas d'assurer une cohérence globale) à un modèle intégré où la conception et la réalisation sont organisées autour d'un objectif commun à l'ensemble des acteurs partageant les responsabilités. La formation de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre (bureaux d'études et architectes) ne devra pas être oubliée, chaque tissu régional devant adapter ses compétences en parallèle de l'augmentation de la demande de bâtiments performants.

### Le foisonnement d'informations non qualifiées pour les professionnels, majoritairement composé d'artisans

Le foisonnement d'informations non qualifiées rend difficile sa lisibilité et son accès. Cela est d'autant plus le cas au regard de la composition du secteur majoritairement composé d'artisans ne disposant pas des moyens de grands groupes. Cela entraîne une réelle difficulté du tissu de TPE-PME à modifier ses offres et à intégrer les nouveaux services et produits. La mise en place de mesures larges d'accompagnement garantissant l'impulsion d'une dynamique efficace et pérenne, doit permettre de mettre à disposition une information soutenue en privilégiant la lisibilité de la performance énergétique des bâtiments au plus près des particularités socio-économiques du terrain et des types de logements.

### La non-diffusion de bouquets de travaux et la non-diffusion d'opérations de diagnostic de qualité

Le développement d'une offre globale autour de bouquets de travaux proposés et portés par des groupes d'éco-artisans permettra à terme la professionnalisation et l'industrialisation des opérations d'amélioration. La diffusion d'opérations de diagnostic menées par des diagnostiqueurs est essentielle pour que les objectifs de rénovation soient atteints et pour que les réalisations les plus performantes soient identifiées. Ces opérations de diagnostic constituent le socle des offres globales pour éviter la succession d'actes d'amélioration désordonnés et inefficaces en privilégiant une planification et un étalement dans le temps et en appréhendant l'ensemble des composantes techniques en fonction de l'opportunité des investissements consentis, compte tenu d'un ratio économique / gains attendus. Lutter contre la précarité énergétique des logements est également un élément clé à prendre en compte.

Des structures de contrôle de la mise en œuvre de la réglementation thermique devront également émerger, notamment au sein des administrations publiques, pour un suivi et un bilan des performances énergétiques et environnementales et pour une résolution des problèmes rencontrés, tels que des défaillances de mise en œuvre, d'intégrabilité des solutions appliquées, etc.

### **Des procédures administratives encore complexes de qualification et d'assurance des matériaux ou solutions innovantes**

Les procédures administratives d'agrément technique freinent encore l'adoption de nouveaux produits et matériaux innovants, ainsi que les problèmes d'assurance engendrant en particulier des difficultés de garantie décennale.

### **Une intégration du bois-construction inférieure aux objectifs nationaux, du fait d'une difficulté à structurer la filière de récolte de gestion de la forêt française**

Il est important de souligner l'intégration inférieure aux objectifs nationaux du bois-construction dans le bâtiment, comme indiqué dans la mission « Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois » confiée à Jean Puech. Malgré l'accord cadre signé par l'État et la profession du bâtiment en mars 2001 (charte bois construction environnement), la part du bois dans la construction stagne à 10 % pour un objectif de 12,5 % en 2010. Il convient de développer progressivement dans la profession le recours au bois dans toutes les constructions, individuelles et collectives, privées ou publiques.

Si le morcellement de la forêt française, ainsi que son statut, freinent l'utilisation du bois comme matériau, il en est de même pour l'inadaptation des normes, d'origine majoritairement scandinave, et l'absence d'essais (essais feu, essais thermiques et acoustiques, travaux de normalisation sur les produits de construction en bois, développement des bâtiments bois à étages multiples, systèmes préconstruits à ossature bois, etc.).

### **Technologies capacitantes, mais non retenues comme clés**

La gestion de l'air dans le bâtiment concerne les systèmes de ventilation et le traitement de l'air (filtration, humidification, rafraîchissement, etc.). Deux objectifs sont recherchés dans l'amélioration de ces équipements : la réduction des consommations énergétiques, le renouvellement de l'air étant à l'origine de déperditions de chaleur et la maîtrise de la qualité de l'air, et l'amélioration du confort des occupants et de leur santé (évacuation des polluants et des germes pathogènes). La gestion de l'air doit préserver les occupants des émissions internes liées à l'utilisation de produits et matériaux et des pollutions externes, grâce à des dispositifs de traitement adaptés en fonction du type de pollutions locales observées.

La gestion de l'air repose sur des technologies existantes et éprouvées. Il s'agit donc d'un enjeu transversal à prendre en compte, tant dans les opérations de réhabilitation que dans le cas des constructions neuves. Le Plan national de santé environnement 2 (PNSE 2) en fixe les éléments essentiels en insistant sur l'insalubrité de certains logements existants.

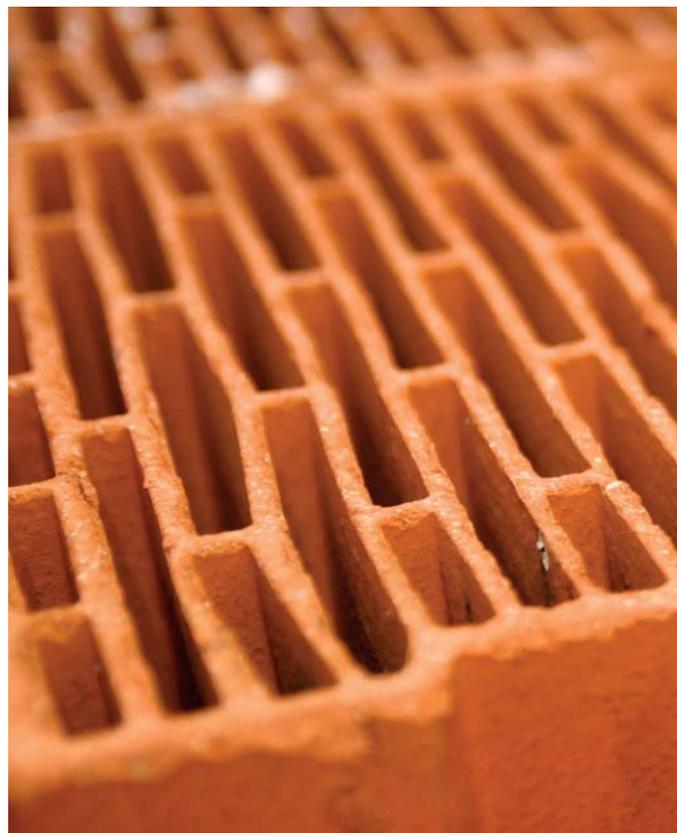
La formation des professionnels est également un enjeu transversal du développement de la filière.

## **Recommandations**

Le bâtiment « à faible impact environnemental » est une filière majeure du Grenelle de l'environnement. Le Plan Bâtiment Grenelle affiche des objectifs ambitieux de réduction de la consommation d'énergie ainsi que des émissions de CO<sub>2</sub>. Le MEEDDM l'a par ailleurs considéré dans son étude *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, publiée par le CGDD en mars 2010, comme l'une des sept filières prioritaires en termes de politique industrielle, compte tenu du rôle que la France pourrait y jouer et de l'intérêt qu'elle en retirerait en termes de développement économique.

Or, pour s'inscrire dans le long terme, il faut certes s'assurer de la qualité des nouveaux bâtiments, mais également travailler sur l'ensemble du parc existant. Pour y parvenir, les technologies clés liées aux matériaux biosourcés, composites et recyclés, aux TIC et aux ENR doivent être mises à disposition de l'ensemble des acteurs de la filière, par le biais de mécanismes financiers et juridiques. Réorienter les aides publiques vers les solutions les plus performantes énergétiquement, conditionner les aides publiques à l'atteinte des performances énergétiques (par exemple, proposer des subventions supplémentaires pour l'atteinte de performances spécifiques), mettre en place des incitations fiscales pour les rénovations dans le tertiaire, etc. sont autant de propositions qui permettraient d'atteindre ces objectifs.

Les appels à projets dédiés et plateformes de démonstration sont également propices pour soutenir l'essor et l'intégration de



ces technologies, les investissements d'avenir constituant sur ce point une opportunité. Des réflexions doivent également être menées pour soutenir l'intégration de ces technologies dans une logique bâtiment. Cet enjeu d'intégration doit en effet tenir compte des volets ENR, des nouveaux matériaux et systèmes constructifs dans une approche globale du bâtiment construit ou à construire. Ces appels à projet pourraient ainsi permettre de lever des verrous encore existants, d'une part techniques, tels que des verrous de conception, de maîtrise des assemblages, d'optimisation des traitements, des processus de mise en œuvre, etc., mais également réglementaires, notamment pour les normes DTU, le passage à des bâtiments bois allant au-delà du R+1, la mise en place de standards de rénovation, etc. L'intégration des technologies devra être recherchée en privilégiant les problématiques de confort, de santé, de sécurité et de conception architecturale.

La performance énergétique et thermique des bâtiments passe par une première phase de diagnostic, de suivi et d'évaluation. Elle permet d'établir un bilan et un suivi des performances énergétiques et environnementales du bâti dans le but d'améliorer les bâtis existants et de réaliser les bâtis les plus performants. Le développement d'offres globales autour de la réalisation de bouquets de travaux performants est pour cela de première importance car il permettrait de tirer pleinement partie des technologies clés et des services de gestion active des équipements.

La lutte contre le réchauffement climatique et l'indépendance

énergétique passent par une transformation de la filière du bâtiment. Les pratiques professionnelles s'en trouvent profondément modifiées. Afin d'aider les acteurs à mieux se positionner, la mise en place de réseaux ou de groupements locaux doit être incitée. Cela passe notamment par la création de centres d'excellence consacrés aux technologies clés et à leur intégration. Au-delà des aspects technologiques, ces mutations doivent également s'appuyer sur des dispositifs de formation et des supports pédagogiques adaptés, tels que des plateformes technologiques en lien avec les industriels et les professionnels de la filière. Comme précédemment indiqué, il est nécessaire de rapprocher la formation des lieux de réalisation (par exemple, visites de chantiers mettant l'accent sur les technologies et équipements clés) et de démonstration. La filière des installateurs-diagnostiqueurs doit également faire l'objet d'une attention particulière, par exemple en certifiant les solutions de rénovation thermique les plus performantes et/ou les entreprises elles-mêmes pour leur capacité à déployer des technologies clés, tant dans la construction que dans l'existant. De plus, un plan de formation spécifique doit être lancé afin de couvrir les besoins pour les jeunes qui intègrent la filière sans bagage spécifique. Les formations continues doivent être proposées en plus grand nombre, l'extension du dispositif Feebat étant l'une des options possibles. Notons que ces évolutions ne pourront se faire qu'à la condition de créer le vivier de futurs enseignants. Enfin, les TIC doivent être intégrées aux besoins de formation, en développant des outils de *e-learning* et des centres de ressources en ligne.





## 70. Systèmes d'enveloppe du bâtiment



### Description

L'enveloppe du bâtiment constitue l'interface avec l'extérieur. Elle englobe les murs, les planchers, les ouvrants, ainsi que la toiture et joue un rôle majeur dans la performance énergétique du bâtiment. À travers des paramètres tels que l'isolation, l'étanchéité à l'eau et à l'air, la gestion des apports solaires ou encore l'inertie, les systèmes d'enveloppe du bâtiment permettent une meilleure efficacité énergétique.

À titre d'exemples, les façades actives, les murs solaires, le vitrage sous vide, les toitures rafraîchissantes, etc. permettent une réduction des besoins énergétiques. L'isolation thermique par l'extérieur (ITE) apporte également une économie d'énergie en créant une enveloppe globale protectrice autour de la construction permettant de traiter les déperditions de chaleur au niveau des façades et des ponts thermiques.

Aux aspects énergétiques s'ajoutent les fonctionnalités nouvelles qu'ils peuvent intégrer. Les façades peuvent devenir intelligentes en s'adaptant à l'environnement extérieur, afin d'offrir davantage de confort à leurs occupants (isolation, confort d'été ou acoustique par exemple). Ainsi, les façades autonettoyantes ou les vitrages électrochromes sont autant d'exemples de développements possibles conduisant à une réduction des pertes énergétiques.

### Applications

Les systèmes d'enveloppe concernent de manière prioritaire l'ensemble des nouveaux bâtiments du secteur résidentiel (individuel ou collectif) et du secteur tertiaire dans un contexte où le Plan Bâtiment Grenelle prévoit que tous les nouveaux bâtiments soient à « basse consommation » (BBC) d'ici à 2012 et à « énergie positive » (Bepos) d'ici à 2020 [11].

Ils concernent également la réhabilitation des bâtiments anciens, le parc existant représentant 29,7 millions de logements [11].

### Enjeux et impacts

L'évolution réglementaire du Grenelle de l'environnement et les défis énergétiques actuels poussent au développement de nouveaux systèmes d'enveloppe. C'est en effet grâce à la rénovation des bâtis existants que la France réussira à atteindre ses objectifs et cette réhabilitation passe par les systèmes d'enveloppes.

Le principal impact attendu est de nature environnementale. Les nouveaux systèmes d'enveloppe doivent permettre de réduire la consommation énergétique de 38 % et les émissions de gaz à effet de serre de 50 % d'ici à 2020 [11]. Ces objectifs varient selon la zone climatique ou le type de locaux concernés (logement, école, bureaux, etc.).

L'impact économique espéré est également non négligeable : le coût de la facture énergétique devrait ainsi s'en trouver réduit.

La mise en place de systèmes d'enveloppe performants nécessite cependant une formation spécifique des professionnels, notamment pour l'intégration de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. L'Ademe œuvre ainsi avec les centres de formation et de conseil à adapter le tissu actuel de formation.

Si l'optimisation du bâtiment et de son enveloppe doit prendre en compte plusieurs critères, le prix des nouvelles constructions est également à considérer car il constitue potentiellement un frein en termes d'acceptabilité : le surcoût d'un bâtiment BBC est estimé à 10 % par rapport à celui d'une construction traditionnelle.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Structures relais** : Advancity, Cerib, Cerma, CSTB, Derbi, FCBA, Fédération Française du Bâtiment, Pôle Fibres Grand Est, Xylofutur
- **Intégrateurs** : Arcelor, Bouygues Construction, Imerys, Lafarge, Materis, Roofing, Saint-Gobain, Vinci Construction
- Concerne aussi bien les fabricants d'isolants que les fabricants d'éléments de construction (briques, éléments de parois, etc.) et de menuiserie

### Principaux acteurs étrangers

- Nippon Steel, Posco (Corée), JFE (Japon), Boosteel (Chine), Nucor, Riva, Tata-Corus, Thyssen Krupp, US Steel

## Position de la France

La France est très bien positionnée avec la présence d'acteurs internationaux, notamment dans la fabrication de vitrages ou de produits pour la façade et la toiture. De nombreuses opportunités existent donc pour créer des filières sur des technologies innovantes (certains citent l'isolation en couche mince).

## Analyse AFOM

### Atouts

Fortes compétences d'acteurs français à dimension internationale.

### Faiblesses

Fragmentation du tissu d'entreprises ; manque de formation spécifique sur les systèmes d'enveloppe ; manque d'offres en prestation globale.

### Opportunités

Position de leader à prendre, notamment sur les systèmes d'isolation en couche mince ; opportunité de créer un « intégrateur » de taille internationale.

### Menaces

Surcoût engendré par les constructions BBC.

## Recommandations

Afin de répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement pour l'existant, des technologies doivent être développées de sorte à être intégrées au bâti. Or, l'installation d'équipements n'est pertinente que dans la mesure où

l'isolation est performante, les installateurs devant s'assurer en premier lieu de ce prérequis. Il est donc crucial de développer une offre adaptée et de structurer un réseau d'entreprises capable de proposer une offre globale, par exemple par le biais d'appels à projets régionaux, chaque artisan devant avoir conscience de l'importance de l'isolation par l'extérieur et des systèmes d'enveloppe adaptés.

Des leviers économiques et financiers doivent être mis en place pour assurer la pérennité économique de la rénovation. Concentrer les dispositifs incitatifs (TVA réduite, subventions, etc.) sur les systèmes d'enveloppe les plus performants peut être un levier, en particulier pour le tertiaire où la pénétration peut être plus facile.

De plus, même si les systèmes d'enveloppe sont diffusants, de nouveaux matériaux minces et plus performants restent encore à développer. Il faut donc encourager les investissements dans la filière et renforcer l'accessibilité aux dispositifs d'appui à l'innovation. Le renfort des solutions de transferts vers le tissu de TPE-PME est clé. Concernant la formation, l'enjeu prioritaire est d'adapter les cycles existants aux besoins des professionnels. Dans un deuxième temps, de nouveaux cycles de formations peuvent être développés, tels que des formations sur le montage des nouveaux isolants par exemple.

Avec la présence de leaders mondiaux du secteur du bâtiment, la France est très bien positionnée pour faire émerger un grand acteur des systèmes d'enveloppe et des matériaux innovants. Une riche stratégie de coopération et de partenariat entre les entreprises et les pôles de compétitivité notamment doit être encouragée : engager un grand programme commun et encourager la création de plateformes démonstratrices, capables d'assurer la passerelle entre le monde de l'innovation et le tissu d'entreprises.

Par ailleurs, les systèmes d'enveloppe doivent être envisagés sous l'angle du couple équipements – systèmes passifs. Aujourd'hui, peu d'acteurs sont positionnés sur de tels équipements, alors qu'il existe un potentiel fort de développement. Cette filière doit donc être soutenue par le biais d'appels à projets spécifiques, permettant de soutenir une démarche partenariale forte, ou encore par le biais de la promotion de labels pour les systèmes d'enveloppe à haute efficacité.

Enfin, la mise en place d'une réglementation précise sur les systèmes d'enveloppe performants permettrait de favoriser le développement de nouvelles technologies, ainsi que leur intégration aux autres technologies clés : orientation des crédits d'impôts aux systèmes d'enveloppe les plus performants, subvention supplémentaire pour l'atteinte de performances spécifiques, etc.

## Liens avec d'autres technologies clés

7

11

40

72

74

75

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



# 71. Systèmes constructifs

## Description

L'éco-construction a pour but la construction de bâtiments dans le respect du développement durable, c'est-à-dire en consommant le moins d'énergie possible et en minimisant l'impact environnemental.

Le bâtiment préconstruit est généralement conçu à partir d'un plan en trois dimensions permettant de composer des modules fabriqués en usine et directement montés à l'emplacement final du bâtiment. Ces modules peuvent être par exemple des pré-planchers ou des pré-murs. Le bâtiment préconstruit fait actuellement majoritairement appel au béton et au matériau bois. Le bois fait également partie des modes constructifs associés à l'éco-construction.

## Applications

Les systèmes constructifs s'intéressent à l'ensemble des éléments de la conception du bâtiment : conception architecturale, orientation, positionnement des ouvertures, traitement de l'isolation, du chauffage, matériaux utilisés, etc. Ils constituent ainsi une voie de développement essentielle dans la recherche de la performance énergétique du bâtiment.

Le système constructif doit s'envisager dans la globalité du bâtiment afin d'adresser l'ensemble de ses problématiques. Il doit ainsi faire le lien avec l'ensemble des éléments constitutifs du bâti : les matériaux utilisés (notamment les matériaux biosourcés, composites et recyclés), les systèmes d'enveloppes ou encore l'interaction entre les fluides et le bâti. L'utilisation de la maquette numérique permettrait par ailleurs de prendre en compte ces éléments dans le but de déterminer le système constructif approprié.

## Jeux et impacts

Les enjeux des systèmes constructifs sont majeurs car leur choix a un impact direct sur la consommation énergétique. Bien orienter le bâtiment, intégrer les matériaux innovants, renforcer l'isolation de l'enveloppe ou utiliser un type de chauffage à énergie renouvelable sont autant d'actions possibles afin de maximiser la performance thermique. Construire les modules en usine avant de les assembler sur l'emplacement final permet de plus de réaliser des chantiers secs (sans eau), de limiter les transports d'engins de chantier, mais également de diminuer les déchets de construction ou encore de permettre la valorisation des coproduits (par exemple en optimisant les chutes de bois récupérées en atelier).

Il subsiste néanmoins des freins au développement des systèmes constructifs. Le préconstruit est un domaine qui n'a pas encore pris son essor en France et attire peu

les investissements. En termes d'acceptabilité, il ne bénéficie pas d'une bonne image de qualité auprès des consommateurs.

Par ailleurs, le choix du système constructif repose sur l'ensemble des corps de métier du bâtiment et nécessite donc une réelle interdisciplinarité. Enfin, le préconstruit s'adresse davantage aux projets de large envergure, tels que la construction de zones pavillonnaires.

Dans le cas des systèmes constructifs bois, d'autres verrous spécifiques sont à adresser : l'expression architecturale doit être adaptée à ce matériau et les caractéristiques spécifiques du bois (assemblage, acoustique, feu, etc.) doivent être intégrées dès la conception.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Structures relais** : Advancity, Cerma, CSTB, Derbi, FCBA, FFB, Pôle Fibres Grand Est, Prebat, Xylofutur
- **Intégrateurs** : BCM, Bodard Construction, Bouygues Construction, CHRYSO, Lafarge, Parexlanko, Saint-Gobain Weber, Solfab, Vinci construction, Yves Cougnaud

### Principaux acteurs étrangers

- Beijing DCTH Steel Structure Science and Technology (Chine), Topsider Building Systems, Method Homes (États-Unis)

## Position de la France

La position de la France est moyenne même s'il existe un bon savoir-faire dans l'ossature métallique et la maîtrise du béton.

Plusieurs PME innovantes, à l'image de Bodard Construction, cherchent à améliorer les modes constructifs, notamment dans le domaine du préconstruit. Bodard construction a ainsi été l'une des premières entreprises françaises à réaliser des maisons modulaires en 2008.

Toutefois, la France est très en retard par rapport à certains pays d'Europe occidentale (et notamment l'Italie), aux pays scandinaves (Danemark en particulier) ou aux États-Unis. Ceux-ci s'intéressent de près aux systèmes constructifs car ils sont confrontés à l'obligation d'améliorer les performances thermiques de leurs constructions neuves.

### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Liens avec d'autres technologies clés

11

40

70

72

73

## Analyse AFOM

### Atouts

Bon savoir-faire dans l'ossature métallique et la maîtrise du béton ; initiatives de PME innovantes ; ressource bois disponible et croissante en France.

### Faiblesses

Peu d'acteurs industriels et académiques ; manque de coordination entre les corps de métier impliqués ; faible valorisation du bois : un potentiel « dormant » ; taux de pénétration du bois encore faible ; absence de structuration et d'industrialisation de la filière bois ; manque d'outils d'ACV pour le bois.

### Opportunités

Valorisation du bois par la mise au point de systèmes constructifs dédiés ; création de valeur et d'emplois locaux.

### Menaces

Forte concurrence, notamment de pays d'Europe occidentale et des États-Unis ; forte concurrence de pays d'Europe du Nord sur l'exploitation du bois à visée habitat et systèmes constructifs.

## Recommandations

Si le béton possède des avantages certains, tels que sa flexibilité, son étanchéité et son coût, et s'il n'est pas question de le remplacer, la filière des systèmes pré-construits peut trouver une place, en particulier s'agissant du bois.

De plus, l'innovation ouvre la porte à de nouvelles opportunités en proposant des produits et matériaux à plus forte valeur ajoutée (finitions sans solvants, structures

plus résistantes, isolants thermiques réversibles, etc.) et offre la possibilité de se tourner vers de nouveaux marchés pour la substitution de produits issus de la pétrochimie et l'intégration des ENR dans le bâtiment existant et neuf. Le développement de la filière construction bois est par ailleurs fortement lié au préconstruit, ce dernier pouvant ainsi apporter une réelle valeur ajoutée à l'usage du bois.

Ainsi, une structuration de la filière des systèmes constructifs impliquant à la fois bois, acier et béton est nécessaire. Pour cela, des leviers économiques et financiers doivent être engagés, notamment par le biais d'appels à projets spécifiques, de plateformes de démonstration dédiées, voire de création d'un cluster spécifiquement dédié à la valorisation du bois à destination des systèmes constructifs, etc.

Une mise à niveau réglementaire pour les systèmes constructifs à base de bois est nécessaire, en soutenant leur adaptation aux normes de construction, principalement sur les futures réglementations (notamment, les RT 2012 et RT 2020), ainsi que les normes DTU. Le passage à des bâtiments au-delà de R+1 devra également être visé. Un lien fort avec les organismes intervenant dans la normalisation est nécessaire. Un fonds de soutien aux petites entreprises pourrait être créé pour assurer les qualifications et leur permettre de lever les verrous réglementaires.

Enfin, des campagnes d'information permettraient de mettre en valeur la filière du préconstruit et de l'éco-construction en sensibilisant l'ensemble des consommateurs (entreprises et grand public) et en lançant une dynamique. De telles campagnes devraient également cibler le bois, afin de permettre son essor en France sur la maison individuelle.

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 72. Matériaux biosourcés, composites et recyclés

### Définitions

Les matériaux biosourcés sont issus de ressources renouvelables obtenues à partir de biomasse (chanvre, lin, bois, etc.), ou de matériaux issus du recyclage (ouate de cellulose, fibres de bois, etc.). Ils peuvent être incorporés, pour tout ou partie au sein de matériaux composites et se substituer en partie à leur composante d'origine pétrochimique. Un matériau composite est défini par l'assemblage d'au moins deux matériaux n'ayant pas les mêmes fonctions, ni les mêmes natures. Les applications des matériaux composites sont nombreuses et d'utilisation courante, en particulier dans les transports (aérien, maritime et ferroviaire) et la construction (respectivement 28 % et 27 % du marché total des composites [12]).

### Description

Les matériaux biosourcés présentent l'opportunité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de stocker du carbone. Les matériaux recyclés valorisent quant à eux des déchets non valorisés, tels que les déchets issus de la déconstruction. Toutefois, ce type de valorisation est embryonnaire sur le plan économique, le nombre de bâtiments déconstruits étant, par exemple, encore bien moins élevé que le nombre de bâtiments construits et la part des matériaux recyclés provenant de la déconstruction, encore anecdotique. Du fait des initiatives locales, l'utilisation des matériaux biosourcés ou recyclés connaît actuellement un engouement certain. Le bois et ses coproduits, utilisés dans les systèmes constructifs sous différentes formes (panneaux de fibres de bois, bois construction ou bois composite), sont l'illustration de cette tendance et représentent un potentiel non négligeable de création de valeur et de développement de filières courtes.

### Applications

Si les matériaux biosourcés trouvent de nombreuses applications dans le bâtiment, notamment pour l'isolation, la plupart ne représente aujourd'hui que des marchés de niche : les isolants biosourcés ne représentent ainsi que 2 % du marché des isolants [12]. Les développements dans le secteur sont pourtant en pleine effervescence : produits tels que le béton de chanvre de plus en plus utilisés en éco-construction ; plusieurs isolants biosourcés sous avis technique (AT) et/ou certification Acermi (Association pour la certification des matériaux isolants), etc.

Le bois construction continue sa progression même si la part du bois dans la construction reste inférieure à l'objectif fixé pour 2010 (10 % contre 12,5 % fixés) [13]. Le Grenelle de l'environnement adresse spécifiquement ce sujet en proposant d'adapter les normes de construction au bois, d'augmenter le taux minimum d'incorporation de bois dans la construction et de favoriser la mise en place d'un label.

### Jeux et impacts

Les enjeux des matériaux composites à base de matériaux biosourcés sont environnementaux dans la mesure où ces matériaux sont renouvelables, contribuent à la réduction de l'effet de serre et représentent une opportunité de substitution aux produits d'origine pétrochimique. Les enjeux sont ensuite économiques. En effet, l'utilisation de ressources locales présente l'opportunité de créer des filières courtes, favorisant la création d'emplois locaux et répondant ainsi à une forte demande du grand public.

S'agissant de l'utilisation des matériaux biosourcés dans la construction, la DGALN a lancé un groupe de travail afin d'identifier les freins et les actions pour les surmonter. Celui-ci réunit les organisations professionnelles représentatives de la filière et doit rendre ses conclusions fin 2010.

Le secteur du bois construction nécessite de plus la mise en place de normes, l'institut FCBA et l'Afnor y travaillant. Les conflits d'usage (alimentation, agrocarburants...), la formation des professionnels, ainsi que le coût engendré par l'utilisation de matériaux biosourcés dans l'éco-construction sont par ailleurs de réelles préoccupations. En outre, des verrous technologiques restent à adresser : résistance au feu, à l'humidité, aux attaques des insectes et moisissures, etc.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

- **R&D** : CNRS, Critt Bois, CSTB, FCBA, FNB, Inra
- **Structures relais** : Afcobois, Alsace Energivie, Capeb, CNDB, CRITT Bois, FFB, Pôle Fibres Grand Est, Iar, Maud, U-TEX, UNSFA, Untec, Xylofutur
- **Intégrateurs/Utilisateurs** : AFT Plasturgie, Bouygues Construction, Charpentes Houot, Dorean, Ecologgia, Gico Constructeur, Gross Charpentes, nrGaïa, Saint-Gobain, Weiss France

#### Principaux acteurs étrangers

- Nexwood (Canada), Timbertech, Trex (États-Unis)

### Position de la France

Ce secteur étant hétérogène, il n'est pas aisé d'en décrire une position française. De nombreuses initiatives locales tentent actuellement de valoriser la biomasse au sein du bâtiment. Celles-ci présentent l'intérêt de créer de l'emploi local et sont également poussées au niveau national par l'Ademe qui soutient fortement le développement de matériaux performants, d'un point de vue technique et de coût. Concernant les matériaux recyclés, ils ne pourront se développer sans que la France ne crée de manière générale des filières locales de recyclage, sources d'emplois locaux, un important retard de structuration devant être soulevé vis-à-vis d'autres pays.

Si de nombreuses initiatives existent en France (création de PME innovantes, telles qu'nrGaïa, développements importants d'AFT Plasturgie pour la valorisation, etc.), elle reste en retard par rapport aux pays les plus avancés, notamment scandinaves, en termes d'intégration.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



Pour la valorisation du bois et de ses co-produits, elle reste fortement en retrait, alors qu'elle possède la troisième forêt européenne [13].

## Analyse AFOM

### Atouts

Ressources agricoles et forestières du territoire ; multiples initiatives de valorisation de la ressource agricole ; PME innovantes ; présence d'acteurs académiques de dimension européenne et de structures de transfert dédiées.

### Faiblesses

Cadre réglementaire non adapté ; absence de bases de données partagées qui rend difficile la comparaison des analyses de cycle de vie ; verrous techniques encore à lever ; qualification de la performance coûteuse ; problème d'assurabilité (garantie décennale) ; manque de structuration de la filière.

### Opportunités

Évolution de la PAC à l'horizon 2013 ; création d'une filière de la déconstruction française ; création d'emplois locaux.

### Menaces

Forte concurrence, notamment des pays scandinaves ; dépendance vis-à-vis de savoir-faire et de portefeuilles de propriété intellectuelle étrangers ; manque de diversification des activités agricoles sur des applications à valeur ajoutée.

## Recommandations

L'utilisation des matériaux biosourcés, composites et recyclés est aujourd'hui favorisée par des politiques régionales misant sur le développement des filières courtes. Plusieurs leviers sont clés pour son développement : formation, qualification, recherche applicative et industrialisation.

Des formations adaptées, spécifiques et accessibles localement doivent être créées pour soutenir le développement de ces matériaux. La simplification des processus d'évaluation de la performance des matériaux biosourcés est également requise, leur variabilité ne devant pas être considérée comme un frein.

Il est par ailleurs nécessaire d'encourager la création et le développement de PME spécialisées, ainsi que d'accompagner celles désirant se réorienter vers le développement de matériaux biosourcés. Les plateformes techniques et projets démonstrateurs doivent être soutenus.

De plus, il existe un enjeu sociétal non négligeable : la PAC (Politique agricole commune) évoluera à l'horizon 2013 et il sera alors nécessaire de prendre en compte la reconversion de certains emplois ruraux (dans une optique de valorisation des agro-ressources, hors bois) et leur diversification. L'industrialisation de l'amont agricole est donc clé, ainsi que le financement de plateformes de démonstration dans un but de sensibilisation.

La mise à niveau réglementaire est clé, notamment pour résoudre les problèmes de garantie décennale. Un fonds de soutien aux petites entreprises pourrait être créé pour assurer les qualifications de performance et de sécurité de leurs matériaux et leur permettre de lever les verrous réglementaires. Un lien fort avec les organismes intervenant dans les normalisations est nécessaire.

Concernant les matériaux recyclés, une réflexion doit être engagée par les pouvoirs publics afin de lancer des appels d'offre sur la déconstruction, comme cela peut se faire dans d'autres pays, notamment en Suisse.

### Liens avec d'autres technologies clés

7

11

37

40

#### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

#### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input checked="" type="radio"/>	En retard

#### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 73. Maquette numérique

### Définitions

#### eXpert

En réponse à l'appel à projets TIC PME 2010 de la DGClS, les organisations professionnelles de la filière du bâtiment se sont unies pour lancer le projet eXpert. Les partenaires à l'origine du projet regroupent les principaux représentants de la filière du bâtiment : Afnor, AIMCC, BuildingSmart, Capeb, CICF, CSTB, CTAI, IT-FFB, Mediaconstruct, OGE, Unapoc, UNSFA, Untec. L'objectif du projet eXpert est de « soutenir et accompagner les progrès liés aux nouvelles pratiques, grâce au partage, à l'échange, à la normalisation et à la sécurisation des informations techniques sur les projets et les produits industriels, auprès de l'ensemble de la filière et tout particulièrement de sa multitude de PME » [14]. Il s'agit, à terme, de mettre à disposition de l'ensemble des acteurs de la filière des outils mutualisés et appropriés tels que la maquette numérique.

### Description

La maquette numérique est la représentation géométrique d'un bâtiment en trois dimensions. Elle permet une gestion rationnelle et cohérente de l'ensemble des informations du bâti (composants, caractéristiques techniques et économiques) et ce, tout au long du cycle de vie (conception, étude, géolocalisation, construction et exploitation). Également appelée *Building Information Modeling* (BIM), la maquette numérique constitue un axe fondamental du bâtiment.

La maquette numérique respecte une norme mondiale : *Industry Foundation Classes* (IFC). Ce format informatique standardisé a été mis en place afin de permettre l'interopérabilité des logiciels. Grâce à ce langage commun, les échanges entre les différents acteurs du bâtiment (maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage, etc.) s'en trouvent facilités et toute modification apportée peut automatiquement être répercutée sur l'ensemble du projet.

De plus, la modélisation et la simulation constituent des outils centraux pour anticiper la performance des bâtiments, lors de leur conception et de leur suivi. La maquette numérique jouera donc un rôle essentiel pour la généralisation des bâtiments BBC à l'horizon 2012 et Bepos d'ici à 2020.

### Applications

Si la maquette numérique peut être utilisée pour tous types de bâtiments, elle concerne en priorité la conception de nouveaux bâtiments.

Elle intervient sur l'ensemble des étapes du projet : relève de l'existant, modélisation générale, architecture, calcul des structures, analyse et simulation des phénomènes environnementaux et analyse économique.

L'ensemble des acteurs du bâtiment est concerné par son intégration : de la maîtrise d'œuvre (architectes, bureaux d'étude, etc.) jusqu'aux métiers du foncier et de la géolocalisation. C'est néanmoins la maîtrise d'œuvre qui sera la plus impactée. Elle devra faire face à des contraintes supplémentaires liées à la structuration de données communes : plans d'architecte, éléments topographiques, etc.

### Jeux et impacts

Le secteur du bâtiment étant fragmenté, chaque corps de métier possède ses propres règles et outils : moyens informatiques et de communication, méthodes de codification et obligations contractuelles sont notamment différents. C'est dans l'optique de remédier à ce manque de standards et à cette hétérogénéité des pratiques et outils que le projet eXpert a par exemple été lancé [14] (voir encadré). Celui-ci a pour but d'harmoniser et de déve-

lopper l'usage des TIC, par l'adoption de la maquette numérique et de la norme IFC.

Les impacts de la mise en place d'une maquette numérique standardisée se trouvent d'abord au niveau de la performance : grâce à des systèmes interopérables et favorisant le travail collaboratif, le gain de temps se traduit en gain d'efficacité, de productivité et financier. Par ailleurs, la qualité de l'ouvrage final est grandement améliorée puisque la coordination des différents corps de métiers est assurée de façon pérenne.

De plus, l'aspect énergétique peut être intégré au projet dès sa conception. Les simulations permettent ainsi d'estimer la consommation énergétique ou l'impact environnemental et donc de répondre aux attentes et exigences d'une construction durable.

La maquette numérique ne devra cependant pas se cantonner à l'aspect énergétique, mais bien englober l'ensemble des fonctions d'usages d'un bâtiment sur l'ensemble de sa durée de vie.

Néanmoins, plusieurs freins subsistent. Bien qu'attrayante, la conception en trois dimensions reste difficile à mettre en œuvre au sein des entreprises. Elle requiert en effet un investissement financier, un investissement en personnel et en temps importants et elle pose de plus la question du partage de la responsabilité.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

- **R&D** : Centre de Recherche en Gestion (CNRS), CSTB, Irex, LCPC, Université de Marne-la-Vallée
- **Structures relais** : Ademe, Advancity, Afnor, AIMCC, BuildingSmart, Cap Digital, Capeb, CICF, CTAI, Derbi, Edibatec, IT-FFB, Mediaconstruct, Ordre des géomètres-experts, Puca, Unapoc, UNSFA, Untec
- **Intégrateurs** : Abvent, All Systems, Attic+, Autodesk, BBS Slama, Bentley, Gehry Technologies, Graitec, Groupe Archimen, Nemetschek, RasterTech, Tekla, Vizelia
- **Utilisateurs** : Bouygues Construction, Eiffage, Vinci Construction, bureaux d'études, cabinets d'architectes, artisans

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Position de la France

La France est bien positionnée du fait de ses fortes compétences de recherche. Plusieurs organismes, tels que la FFB ou la branche française de BuildingSmart, encouragent de plus l'adoption de standards. Par ailleurs, plusieurs éditeurs tels qu'Abvent, Autodesk ou RasterTech ont rapidement adopté la norme IFC.

La France est donc dans le groupe de tête au niveau européen, les pays scandinaves manifestant également un intérêt croissant pour cet outil.

## Analyse AFOM

### Atouts

Compétences fortes en modélisation ; initiatives d'acteurs, plusieurs éditeurs ayant par exemple adopté la norme IFC ; implication des industriels ; structures favorisant l'adoption de standards : FFB, branche française de BuildingSmart.

### Faiblesses

Faibles investissements des acteurs français ; difficultés pour le tissu de TPE-PME d'acquisition de ce types d'outils sur le plan financier ; manque de formations adaptées.

### Opportunités

Atout en termes de performances économiques comme énergétiques ; intégration de la traçabilité et des enjeux de recyclage dès les premières étapes de conception.

### Menaces

Forts développements dans les pays avancés en matière de bâtiment à moindre impact environnemental pour développer de nouveaux outils ; manque d'outils pertinents pour les systèmes constructifs, notamment à base de bois, limitant de fait son essor.

## Recommandations

Si les industriels ont déjà intégré la logique de la maquette numérique, l'impulsion à l'essor de cette filière doit en premier lieu provenir de la maîtrise d'ouvrage. En effet, certains outils existent d'ores et déjà, mais restent peu utilisés par les cabinets d'architectes, du fait de la lourdeur d'investissement en personnels compétents et en logiciels 3D.

Les pouvoirs publics doivent s'interroger plus largement sur les conditions d'adoption de ce type d'outils, au regard de la fragmentation du tissu et de l'absence d'acteurs supportant son utilisation et la diffusant. Des aides financières spécifiques pourraient être envisagées pour résoudre ce point clé.

Par ailleurs, bien que l'ANR soutienne les initiatives lancées dans ce secteur, les investissements soutenant le développement de logiciels restent insuffisants. Il est donc nécessaire de favoriser la création et le soutien de projets portant sur la maquette numérique, par exemple par l'insertion de lignes dédiées dans les appels à projets. Ces appels à projets devront également être déclinés pour les systèmes constructifs bois, afin de soutenir l'essor de cette filière par des systèmes de modélisation et de conception adaptés.

De plus, et afin de simplifier les échanges entre les multiples acteurs impliqués, des plateformes collaboratives de test « open source » doivent être financées pour favoriser une utilisation interdisciplinaire.

Afin de répondre à la diversité des compétences requises, des formations adaptées doivent être proposées au sein des écoles d'ingénieurs et des écoles d'architecture. Enfin, il semble pertinent de poursuivre le soutien de l'action de BuildingSmart en France, ainsi que les plans d'actions favorisant l'utilisation des TIC dans le bâtiment.

## Liens avec d'autres technologies clés

20

28

29

71

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input checked="" type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## 74. Comptage intelligent

### Définitions

Le comptage intelligent consiste en la mise en réseau de fonctions clés liées au bâti (ventilation, chauffage, fluides, etc.), par la mise en place de capteurs, actionneurs et logiciels. Il consiste en une approche globale tenant compte de l'ensemble des flux gérés dans le bâtiment : électricité, gaz, eau, air, etc. Il s'agit de compteurs communicants, capables de recevoir et d'envoyer des données sans intervention humaine, pour la mesure et la gestion des flux.

De tels compteurs permettent de suivre en temps réel la consommation énergétique d'un bâtiment, foyer ou entreprise.

### Description

Les avantages majeurs du comptage intelligent résident dans la maîtrise de la dépense énergétique et l'établissement de la facture client sur la base de sa consommation réelle et non de sa consommation estimée.

De nouvelles offres et de nouveaux services peuvent de plus être proposés par les grands énergéticiens, permettant par exemple d'échelonner la consommation. Le comptage intelligent peut ainsi être un outil de contrôle permettant une meilleure maîtrise des flux et de ce fait limitant par exemple les pertes et les pannes de réseau.

L'enjeu majeur reste la diminution de la quantité de capteurs présents dans le bâtiment tout en les optimisant. Pour cela, les capteurs doivent être robustes, étalonnés et fiables.

### Applications

Si le comptage intelligent renvoie le plus souvent aux compteurs d'électricité, il peut également concerner les compteurs d'eau et de gaz.

En France, 35 millions de compteurs électriques sont actuellement en fonctionnement. L'Union européenne ayant demandé aux pays membres d'expérimenter le dispositif, ErDF, principal distributeur français, a lancé en 2007 le projet Linky, qui sera déployé en une dizaine d'années. ErDF a ainsi prévu l'installation de 250 000 compteurs en Indre-et-Loire et dans l'agglomération lyonnaise en 2010. Si l'expérience se révèle concluante, les compteurs intelligents se déploieront sur le territoire entre 2012 et 2017 [15].

Le moteur de l'industrie du comptage intelligent réside dans l'électrique et il n'est, à l'heure actuelle, pas prévu d'expérimentation au niveau national pour l'eau et le gaz, même si plusieurs industriels indépendants proposent leurs services pour le suivi de ces consommations.

Notons également que la mise en place de compteurs intelligents, quelque soit le fluide considéré, nécessite des technologies avancées. Ceci implique de remplacer les compteurs actuels, rallongeant ainsi les temps de déploiement et augmentant les coûts associés au comptage intelligent.

Notons également qu'il existe enfin une opportunité de coupler l'infrastructure énergétique du bâtiment aux véhicules électriques. Dans une telle configuration qu'il conviendra de définir, les nouveaux bâtis pourraient ainsi intégrer des prises nécessaires à la recharge de ces véhicules.

### Enjeux et impacts

L'enjeu majeur du comptage intelligent réside dans les économies potentielles engendrées, de l'ordre de 5 % à



15 % [15]. La réduction de la facture pour le particulier ou l'entreprise devrait ainsi être supérieure à l'investissement requis pour l'installation (entre 12 et 24 euros par an pendant dix ans [15]).

En termes d'acceptabilité, le problème de l'atteinte à la vie privée est soulevé par plusieurs associations de consommateurs. La question de la rétention des données doit donc être traitée de manière attentive.

Enfin, les dispositifs existants ne permettent pas encore un accès direct à la consommation, ni par l'utilisateur, ni par l'agent de relève. Un intermédiaire (outils complémentaires ou agents de relève) doit donc intervenir afin de transmettre les informations relatives à la consommation.

À ces problématiques de transmission de données, s'ajoutent des problématiques techniques qu'il reste à résoudre afin d'atteindre une fiabilité maximale et éviter les dysfonctionnements.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

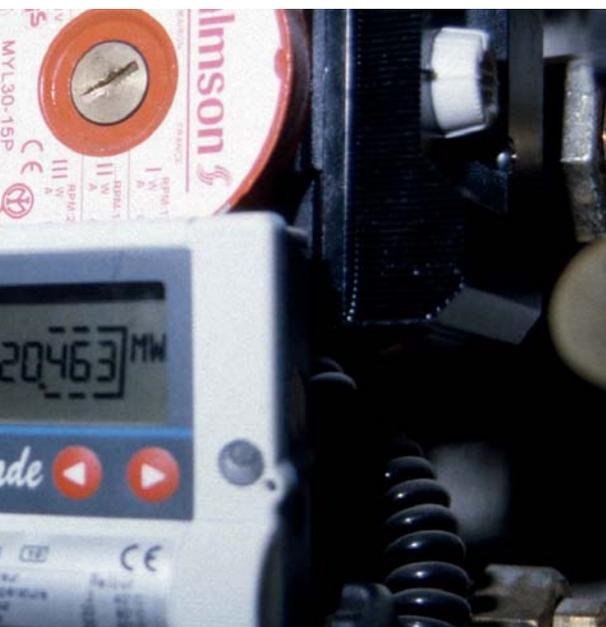
- **R&D** : CEA, CSTB
- **Structures relais** : S2E2
- **Intégrateurs / Utilisateurs** : Aergy, Atos Origin, Domtis, Edelia, Effineo, Enerdis, ErDF, Gaz de France, Google Power Meter, HomeRider Systems, Ijenko, Ista, Legrand, Poweo, Sinovia, Sierra Wireless, Schneider Electric, ST Microelectronics, Vizelia, Voltalis, Wirecom Technologies

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



## Position de la France

Le comptage intelligent s'applique aujourd'hui essentiellement aux compteurs électriques. Si la France est bien positionnée dans ce domaine avec l'expérimentation actuellement menée, d'autres pays l'ont néanmoins précédée. Ainsi, l'Italie a été pionnière en étant le premier pays intégralement équipé de compteurs électriques intelligents. Le déploiement a débuté en 2000 et s'est achevé en 2005. Les dépenses énergétiques ont depuis diminué de 5 % par an [16].

De nombreux pays ont ensuite emboîté le pas à l'Italie, notamment la Suède, la Norvège, la Finlande, l'Espagne, l'Allemagne, l'Irlande, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, l'Australie, le Canada, les États-Unis et la Turquie. Par ailleurs, l'UE a demandé en 2009 d'expérimenter ce type de dispositifs. L'objectif est de parvenir à équiper 96,3 millions de foyers d'ici à 2014 et près de 80 % de foyers d'ici à 2020 [16].

## Analyse AFOM

### Atouts

Expertise académique et industrielle reconnue dans l'élaboration de réseaux ; initiatives d'acteurs industriels, tels que le projet Linky d'ErDF.

### Faiblesses

Filière peu structurée avec une définition floue du comptage intelligent ; technologies telles que la production décentralisée, non matures ; investissements lourds requis par les potentiels utilisateurs ; manque d'informations vis-à-vis des utilisateurs et d'interface ergonomique adap-

tée pour leur sensibilisation ; pour des raisons culturelles, acceptabilité pour les maisons individuelles.

### Opportunités

Volonté forte au niveau européen pour développer le comptage intelligent ; marché potentiel important avec de larges possibilités à l'export ; potentiel de création d'emplois et de création de valeur.

### Menaces

Concurrence notamment provenant des États-Unis avec des acteurs d'autres métiers, tels que Google, Cisco, IBM ou Intel, se positionnant déjà avec des projets de large envergure à Miami ou Orlando, etc.

## Recommandations

Le comptage intelligent est une composante clé d'une approche globale de l'ensemble des composantes énergétiques du bâtiment. Il s'agit en effet d'une technologie centrale et structurante pour la filière, en particulier du fait de la richesse de services en résultant.

Il est ainsi nécessaire de poursuivre son déploiement et son utilisation. La sectorialisation de son déploiement est pour cela indispensable, en se donnant notamment des objectifs très ambitieux sur le tertiaire pour lequel la pénétration potentielle à court terme peut être plus forte. L'essor de ces technologies pour les maisons individuelles risque d'être plus long, en raison de difficultés sociétales liées à des craintes d'atteinte à la liberté.

Il n'existe pas d'obligation réglementaire incitant le consommateur à mieux gérer sa consommation énergétique. Pour qu'il devienne acteur, il est donc nécessaire d'encourager son éducation et sa sensibilisation par l'organisation de campagnes d'information, la mise en place de dispositifs, tels que les certificats d'énergie, etc.

La solidité, la fiabilité et la pérennité des capteurs sera un enjeu clé pour rassurer le consommateur et ne pas nuire économiquement à l'essor de la filière par le biais de frais d'intervention sur site pour leur remplacement, réparation, etc.

L'interface homme-machine jouera également un rôle clé pour permettre à l'utilisateur un suivi régulier de ses consommations. Des progrès significatifs sont à faire dans ce domaine et sont une condition *sine qua non* à la bonne sensibilisation de l'utilisateur.

Enfin, la mise en place d'une base de données fiable sur la rénovation et la construction neuve de bâtiments aurait à terme pour effet d'améliorer et de piloter de manière pérenne les performances énergétiques d'un bâtiment.

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



# 75. Technologies d'intégration et de mutualisation des ENR dans le bâtiment

## Définitions

Les principales sources d'énergie renouvelable sont le soleil (solaire thermique, photovoltaïque), l'air (éolien), le sol (géothermie), l'eau (hydroélectricité) et les forêts (bois énergie).

Le solaire, bénéficiant d'un encouragement de l'État, reste l'ENR la plus utilisée dans le bâtiment.

Sa lumière permet de produire de l'électricité (photovoltaïque) alors que son rayonnement est transformé en chaleur (thermique) afin de chauffer l'eau domestique.

Le bois énergie est quant à lui couramment utilisé pour le chauffage urbain, mais des verrous technologiques liés aux émissions de particules et à la postcombustion, ainsi qu'à l'entretien restent à lever. Les bâtiments n'étant pas tous éligibles, la géothermie sert de source d'énergie d'appoint. De même, du fait de problèmes sociétaux et de questions liées à la maintenance, l'énergie éolienne n'est principalement utilisée que sur des lieux isolés. Les pompes à chaleur regagnent quant à elles de l'intérêt, même si les performances réalisées ne sont pas encore à la hauteur des attentes.

## Description

Le bâtiment est en France le secteur le plus consommateur d'énergie et contribue donc de manière importante à l'émission de CO<sub>2</sub> (70 Mtep par an soit 43 % de l'énergie finale totale) [11]. L'utilisation des énergies renouvelables (ENR) dans le bâtiment représente une voie possible pour limiter cette consommation. Ces sources d'énergie peuvent être intégrées physiquement au bâtiment pour permettre la production, voire le stockage de l'énergie. Ainsi, le bâtiment couvrirait ses propres besoins et serait en mesure de distribuer l'énergie non consommée. Par ailleurs, la production pourrait être mutualisée à l'échelle d'un quartier afin de limiter les pics de consommation.

## Applications

Les ENR trouvent leurs applications aussi bien dans le tertiaire que dans le résidentiel. Elles concernent principalement la production d'eau chaude (chauffage et eau chaude sanitaire) et d'électricité (pour couvrir ses propres besoins ou pour la revente).

Alors que la production nationale d'énergie primaire s'élève à 137 Mtep, la production d'énergie primaire renouvelable atteint, en 2008, 19 Mtep, en hausse de 12,7 % par rapport à 2007 [11].

Le solaire photovoltaïque connaît une forte croissance mondiale. L'Association européenne de l'industrie photovoltaïque (EPIA) estime que le parc cumulé se monte à 21 000 MWc en 2009. En 2014, ce chiffre atteindrait les 71,7 à 122,7 GWc. En Europe, le marché cumulé est estimé à 14 GWc en 2009 et entre 46,7 et 66,1 GWc d'ici à 2014. La France se situe en cinquième position mondiale avec un parc cumulé de 430 MWc en 2009. Le marché du photovoltaïque dans le bâtiment atteindrait, en France, 13,4 GWc cumulés fin 2020 [17]. Une concertation est en cours avec la puissance publique sur les coûts de ce déploiement.

Le marché du solaire thermique est également en croissance. Le parc solaire thermique installé fin 2008 en Europe atteint 19 982,7 MWth, avec des marchés leaders tels que l'Allemagne [18]. En France, le Plan Soleil de l'Ademe en 1999 a permis d'encourager son utilisation. Le parc cumulé français fin 2008 totalisait ainsi près de 1,9 million de m<sup>2</sup> installés, soit un équivalent de 1 314 MWth. Il est estimé à plus de 21 millions de m<sup>2</sup> en 2020 [18].

Les ENR concernent tant le secteur de la rénovation que celui de la construction neuve. Le stock de bâtiment actuel représente plus de 814 millions de m<sup>2</sup> de bâtiments tertiaires chauffés [11], auxquels s'ajoutent chaque année 14 millions de m<sup>2</sup> : autant d'opportunités d'intégrer et de mutualiser les ENR au sein du bâtiment [11].

## Enjeux et impacts

L'intégration et la mutualisation des ENR dans le bâtiment participent de manière active à la réduction de la consommation énergétique. Les pays industrialisés sont tenus de diviser leurs émissions par quatre ou cinq en moins de cinquante ans, soit une consommation moyenne d'énergie primaire de l'ordre d'une centaine de kWh/m<sup>2</sup> en 2050 pour l'ensemble des bâtiments en service [11].

De plus, le secteur des énergies renouvelables a de fortes retombées économiques. Ainsi, considérant le fort potentiel de développement du solaire photovoltaïque et thermique en France, près de 120 000 emplois seraient mobilisés d'ici à 2020 [11].

Par ailleurs, la mise en place de standards pour l'intégration des ENR aboutirait à une intégration physique rapide, efficace et sûre.

Certains freins, tels que la disponibilité de la ressource, dans le cas de la biomasse notamment, peuvent néanmoins ralentir leur progression. La formation des professionnels reste également un frein au développement. Par ailleurs, les problèmes de sécurité (notamment pour le photovoltaïque), et d'étanchéité ne sont pas encore résolus. La question de la responsabilité financière est également importante entre les corps de métier. De plus, en termes d'acceptabilité, les coûts d'installation élevés peuvent freiner l'adhésion des consommateurs.

Afin de pallier tout ou partie de ces verrous et ainsi améliorer la rentabilité économique de ces innovations, une rupture technologique est donc nécessaire.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA, Cenerg, Certisolis, Cethyl, Cetiati, Costic, CSTB, GRETh, Ines, Itebe, LNE, Promes
- **Structures relais** : Advancity, Ademe, A fineole, Afpac, Alsace Energivie, Avenia, Capenergies, Cler, CRE, Derbi, Dream, Enerplan, Estif, Fondation pour le Développement des Energies Renouvelables, Observ'ER, S2E2, Technosolar, Tenerrdis
- **Industriels** : Apex BP Solar, CIAT, Clipsol, EDF, Enalsa, Erset, France Géothermie, Photowatt, Poweo, Saint-Gobain, Technibel

## Position de la France

La France se situe dans la moyenne des pays européens quant à la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire (7,5 % en 2008 [19]), mais elle reste loin derrière les pays les plus avancés, tels que la Suède, la Lettonie, l'Autriche ou la Finlande. La Suède

### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



s'est par exemple fixé comme objectif d'atteindre 49 % de production d'ENR d'ici à 2020, ce taux se montant aujourd'hui à 40 % [16].

Les aides fiscales ont permis de développer la maîtrise des différents usages des ENR dans le bâtiment, particulièrement dans le solaire. L'Ademe a par ailleurs lancé plusieurs programmes, dont le programme « bois énergie 2000-2006 » et le Plan Soleil (lancé en 1999). La France possède par ailleurs le deuxième potentiel éolien européen, ainsi qu'un très bon potentiel solaire. Cependant, ces aides sont focalisées sur les technologies disponibles et non sur les technologies d'avenir.

## Analyse AFOM

### Atouts

Soutien de la demande par les politiques publiques (Grenelle de l'environnement, aides fiscales, etc.) ; compétences technologiques présentes ; potentiel environnemental favorable, par exemple avec un ensoleillement de 1 200 kWh/m<sup>2</sup>/an.

### Faiblesses

Peu d'acteurs reconnus ; cadre réglementaire rigide et complexe ; manque de main d'œuvre qualifiée.

### Opportunités

Marché potentiel important et possibilité à l'export ; création d'emplois ; place pour des acteurs français à l'international (marché mondial encore très fragmenté).

### Menaces

Forte concurrence et retard par rapport aux pays européens leaders.

## Recommandations

De forts investissements sont nécessaires pour lever les verrous technologiques et espérer un gain de compétitivité. Il sera pour cela nécessaire d'adapter les dispositifs de soutien à l'innovation, notamment par des appels à projets spécifiques. De tels outils permettront également de développer le tissu d'industriels.

Par ailleurs, il existe un réel besoin de mesure et de garantie de la performance. Ces enjeux peuvent être adressés par la mise en place de méthodes de calcul des performances, de standards et de labels français.

L'élaboration de solutions clés en main est également un point déterminant. Le fait de favoriser l'interdisciplinarité avec la création de plateformes mutualisées innovantes et de soutenir les plateformes existantes le permettrait. Enfin, l'enjeu réside dans l'utilisation simultanée de différentes ENR, selon le type de bâtiment considéré, son usage, ainsi que sa localisation géographique : encourager la recherche sur l'intégration simultanée de différentes ENR par le biais d'appels à projets spécifiques et de démonstrateurs dédiés, équipés de capteurs, intégrant les TIC et conçus dans une optique évolutive, permettrait d'y répondre. De tels démonstrateurs permettraient également de prendre en compte les aspects d'usages, de multifonctionnalité, d'esthétisme et de confort, de facilité de mise en œuvre et de gestion, de santé-environnement, ainsi que les notions de coût, etc.

### Liens avec d'autres technologies clés



Maturité (échelle TRL)	
●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

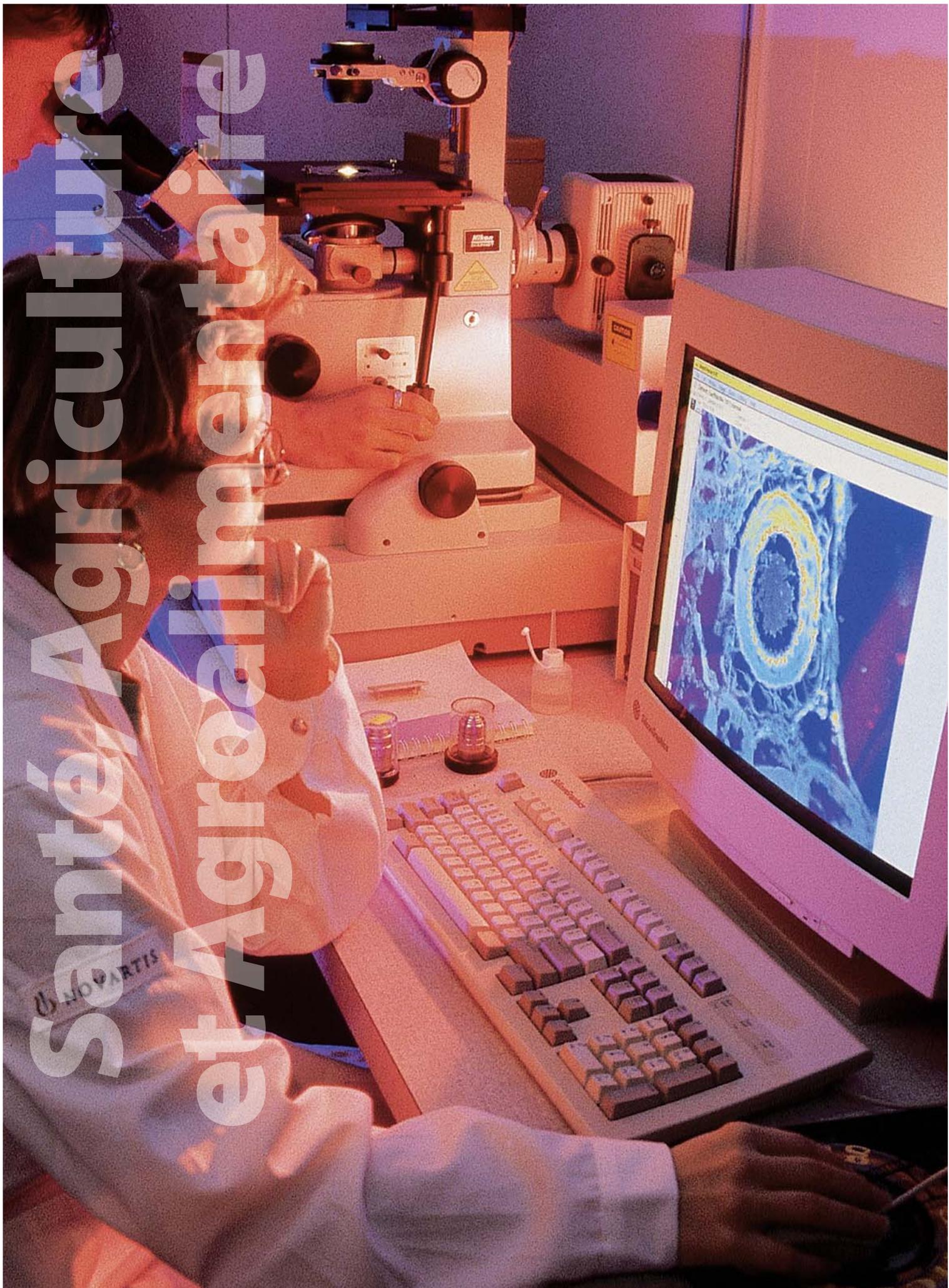
Position de la France	
●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

Potentiel d'acteurs en France	
●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## BIBLIOGRAPHIE

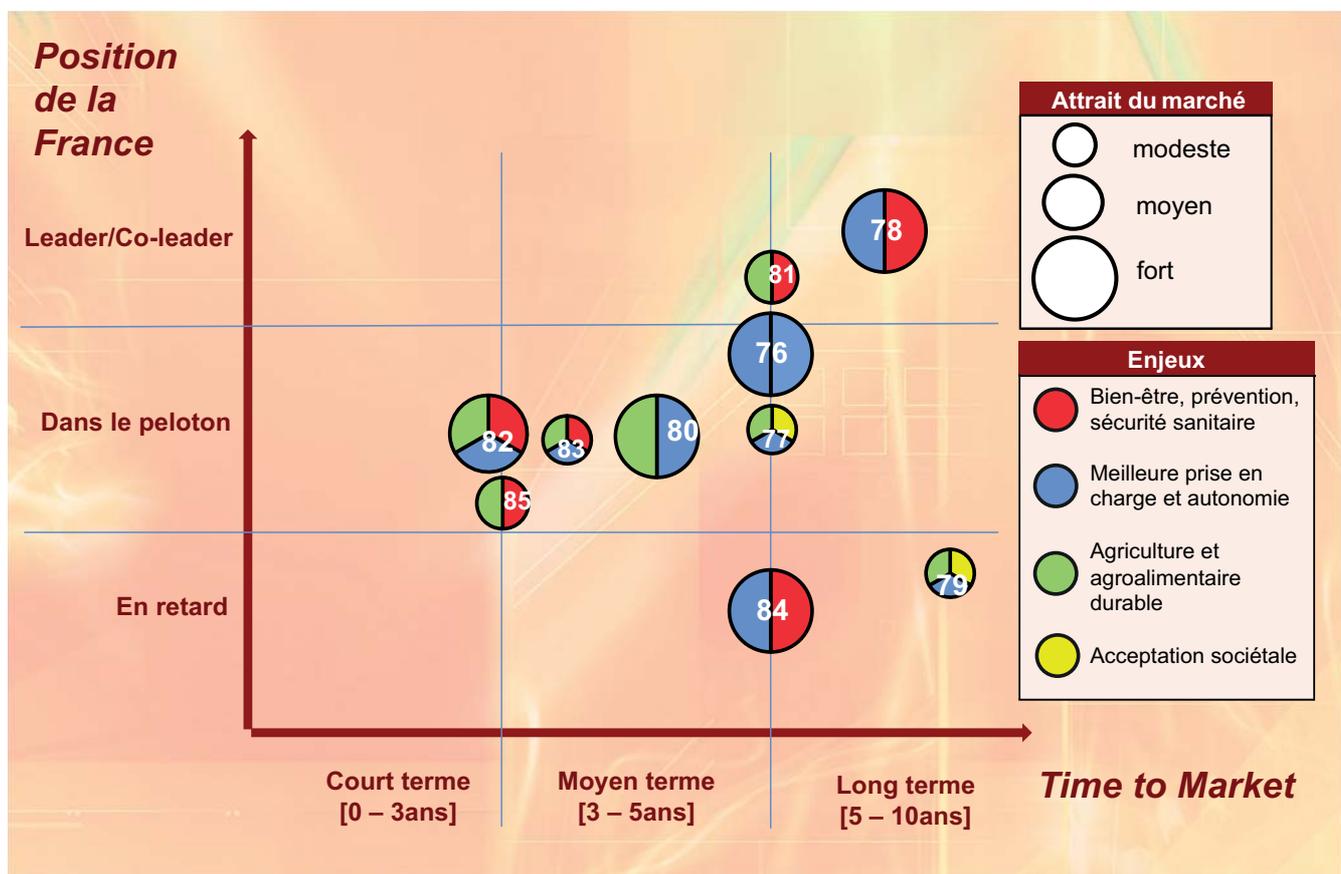
- [1] Capeb d'après Unedic – EAE
- [2] Capeb d'après Sirene au premier janvier 2008
- [3] Estimation Capeb à partir des données 2007 du BAESP
- [4] Artisanat du bâtiment, Capeb, Chiffres clés 2009
- [5] Capeb d'après EAE 2007
- [6] Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Emploi, Sessi, *Les fournisseurs de la construction en chiffres*, édition 2007
- [7] Pelletier, P., Rapport du comité opérationnel *Rénovation des bâtiments existants*, 2008
- [8] MEEDDM, [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- [9] Ceren, [www.ceren.fr](http://www.ceren.fr)
- [10] The Boston Consulting Group, *Développer les éco-industries en France*, décembre 2008
- [11] Ademe, [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- [12] JEC Composites, [www.jeccomposites.com](http://www.jeccomposites.com)
- [13] Puech J., *Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois*, 2009
- [14] eXpert, [www.projet-expert.com](http://www.projet-expert.com)
- [15] Usine nouvelle, [www.usinenouvelle.com](http://www.usinenouvelle.com), d'après Énergie 2007 et le ministère de l'Énergie, 2010
- [16] Euractiv, [www.euractiv.com](http://www.euractiv.com)
- [17] Epia, [www.epia.org](http://www.epia.org)
- [18] Enerplan, [www.enerplan.asso.fr](http://www.enerplan.asso.fr)
- [19] Insee, [www.insee.fr](http://www.insee.fr)
- IT FFB, *Maquette numérique bâtiment – BIM-IFC*, mai 2009
- MEEDDM, *Etude « filières vertes » : les filières industrielles stratégiques de la croissance verte*, octobre 2009
- Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Emploi, *Les fournisseurs de la construction en chiffres*, édition 2007
- Nth Power & Fraunhofer, *Innovating for better buildings – An opportunity disguised as a meltdown*, octobre 2009
- Pelletier, P., Rapport du comité de filière « métiers du bâtiment », décembre 2009
- Prebat, Ademe, CSTB & Puca, *Comparaison internationale bâtiment et énergie*, décembre 2007
- World Business Council for Sustainable Development, *Energy efficiency in buildings – Transforming the market*, avril 2009
- Xerfi, *Marchés de la rénovation thermique des bâtiments à l'horizon 2012*, janvier 2010



# Santé, Agriculture et Agroalimentaire

# Santé, Agriculture et Agroalimentaire

- 76. Ingénierie cellulaire et tissulaire
- 77. Ingénierie génomique
- 78. Ingénierie du système immunitaire
- 79. Technologies pour la biologie de synthèse\*
- 80. Systèmes bio-embarqués
- 81. Technologies pour la maîtrise des écosystèmes microbiens
- 82. Capteurs pour le suivi en temps réel
- 83. Technologies de diagnostic rapide
- 84. Technologies pour l'imagerie du vivant
- 85. Technologies douces d'assainissement



(\*) TC 79 : il s'agit de prévision à cinq ans ; les prévisions sont plus importantes à 10-15 ans.

## Contexte et enjeux

Dans le cadre de l'étude, le secteur des sciences du vivant comprend les technologies de la santé, de la cosmétique, de l'agriculture et de l'agroalimentaire, couvrant les besoins des individus de se nourrir et de se soigner. Tous ces domaines sont de forts contributeurs dans la balance commerciale française.

### Santé

Les secteurs de la santé peuvent être classés en trois grands groupes :

- les services de santé : l'ensemble des services de santé et de soin fournis à la population ;
- les produits de santé : l'ensemble des produits visant à maintenir la bonne santé de la population ou à traiter des personnes souffrantes. Ces produits sont issus des industries de santé ;
- les services de support à la santé : l'ensemble des services n'ayant pas directement trait au système de soin mais visant à supporter les services et les produits de santé.

Parmi ces secteurs, les produits et services générateurs de développement économique pour les entreprises figurent ci-dessous.

Services de santé et de bien-être	Services sociaux pour la santé	• Soins à domicile
	Dispositifs médicaux	• Industrie des dispositifs médicaux
Produits de santé et de bien-être	Produits pharmaceutiques	• Industrie pharmaceutique • Synthèse d'ingrédients pharmaceutiques actifs • Homéopathie
	Alimentation santé	• Industrie des compléments alimentaires • Industrie des aliments fonctionnels
	Cosmétique	• Parfums • Produits de toilette
Services de support	Services à l'industrie pharmaceutique	• Grossistes répartiteurs • Contrat Research / Manufacturing Organizations (CRO/CMO) • Autres (sociétés de conseil par exemple)
	Prise en charge	• Assurance publique • Assurances privées • Fonds d'investissement • Fonds de pension
	E-Santé	• Industrie de la e-santé

Les industries de santé se partagent en deux domaines : d'une part, celles qui développent et commercialisent des produits pharmaceutiques de base et des médicaments, d'autre part, celles qui élaborent et commercialisent des dispositifs médicaux. Elles réalisaient en 2008 un chiffre d'affaires mondial de 716 Md€ [1, 2]. En Europe, la balance commerciale des industries de santé est fortement positive avec 34,8 Md€, dont 29 Md€ pour l'industrie pharmaceutique et 5,8 Md€ pour l'industrie des dispositifs médicaux [3].

### Produits de santé : produits pharmaceutiques

Chiffres clés des industries de la pharmacie

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises de 20 salariés et plus
Fabrication de produits pharmaceutiques de base	1,90	7,7	23
Fabrication de médicaments	42,3	89,4	191
Fabrication d'autres produits pharmaceutiques	2,2	11	36
Total pour les industries de la santé	46,4	108,1	250

Le marché mondial du médicament atteint 550 Md€ en 2008 [5] et connaît un taux de croissance entre 5 et 7 % sur la période 2006-2008, notamment du fait de l'augmentation rapide du niveau de vie dans les pays émergents et de l'exigence croissante de la population quant à la qualité de sa prise en charge. Le marché européen représente 32 % de ce marché. La France a quant à elle généré un chiffre d'affaires de 50 Md€ (prix fabricants HT) en 2009, soit une progression de 7,7 % en deux ans [1, 4]. La France est ainsi le premier pays producteur de médicaments dans l'UE25. L'industrie pharmaceutique européenne emploie 635 000 salariés dont 117 000 en recherche et développement (R&D).

L'industrie pharmaceutique a un poids croissant dans l'économie française. En effet, la croissance de la valeur ajoutée en volume de l'industrie pharmaceutique a été de 8 % par an, alors que celle de l'économie au global n'a été que de 2,1 % [6]. Par ailleurs, il s'agit du deuxième secteur industriel pour le niveau d'investissement en recherche, avec près de 5 Md€ investis en 2008 [6] ; au niveau européen l'industrie pharmaceutique se place en première position pour son effort de R&D (avec 27 Md€ investis en 2008 [5]). Enfin, les échanges commerciaux de médicaments représentent le quatrième excédent commercial de la France, avec 6,8 Md€ en 2009 [1]. La France est ainsi le cinquième exportateur pharmaceutique mondial, mais ses parts de marché à l'exportation de médicaments ont toutefois reculé depuis la fin des années 1990.

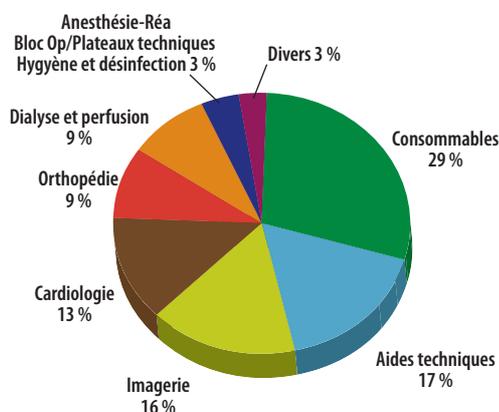
La France constitue le deuxième marché de santé animale au monde, et le premier marché européen, avec une industrie du médicament vétérinaire réalisant un chiffre d'affaires de 835 M€ en France et 1,4 Md€ à l'exportation [6].

L'industrie pharmaceutique a longtemps été un secteur important en termes de création nette d'emplois industriels ; toutefois, la conjoncture actuelle menace d'un important recul de l'emploi à l'horizon 2015 [1].

#### Produits de santé : dispositifs médicaux

Le marché mondial du dispositif médical hors diagnostic *in vitro* est estimé à environ 166,6 Md€ en 2008, dont 53,6 Md€ pour le marché européen [7], et connaît une progression de 5-6 % par an [2]. L'Allemagne est clairement le leader du marché européen, avec 27,8 % du marché européen. En France, le marché était de 6,2 Md€ en 2008 pour les dispositifs médicaux hors diagnostic *in vitro* [2].

Répartition du marché des dispositifs médicaux (hors diagnostic *in vitro*) en 2008 en France [2] (100% = 6,2 Md€)



En 2008, le marché mondial du diagnostic *in vitro* est de 27 Md€, dont 9,98 Md€ pour le marché européen [8, 9]. La France représente, quant à elle, 16,6 % de ce marché, se plaçant en seconde place en Europe (derrière l'Allemagne).

Il y a environ 11 000 entreprises de technologies médicales en Europe, sachant que les petites et moyennes entreprises (PME) représentent plus de 80 % de ce tissu [7]. L'industrie technologique médicale européenne emploie 435 000 salariés et l'effort de R&D représente 8 % du chiffre d'affaires en 2008 [2, 6]. En France, on dénombre plus de 5 300 entreprises et environ 40 000 salariés [6].

L'enjeu pour les entreprises françaises est d'exister dans les dispositifs médicaux à forte valeur ajoutée, pour conquérir des parts de marché, en particulier sur les marchés publics hospitaliers, qui pèsent en France plus de 15 Md€ par an [10], et à l'étranger.

### Aliments santé et produits de cosmétique

Certains aliments santé ou alicaments revendiquent un effet sur la santé, reconnu ou non par les autorités de santé, sans avoir le statut de médicament. Le marché des alicaments représente un chiffre d'affaires de 80 Md€ en Europe, Amérique du Nord et Japon [6] (chiffre incluant les compléments alimentaires). En 2007, le marché mondial des aliments fonctionnels (hors compléments alimentaires) atteint 46,7 Md€ et les projections ciblent un rythme de croissance de 5,7 % de croissance par an [11] après avoir connu une croissance de 13 à 14 % par an les cinq années précédentes [12]. Plusieurs raisons viennent expliquer cette croissance : le vieillissement de la population, l'augmentation des dépenses de santé, l'intérêt croissant des consommateurs pour la nutrition et le bien-être, ainsi que les avancées scientifiques et cliniques reliant la nutrition à la prévention des maladies.

En France, le marché des alicaments a connu une croissance de 10 % en 2007 et un volume de ventes de 8 Md€ [13]. L'industrie évolue du fait de cet essor, avec un intérêt marqué des industries pharmaceutiques elles-mêmes (acquisition par Sanofi-Aventis de Symbion) et l'orientation massive des acteurs de l'agroalimentaire vers ce marché (acquisition de Numico par Danone par exemple).

Chiffres clés des industries de fabrication de parfums et de produits pour la toilette 2007, pour les entreprises de 20 salariés ou plus

	PMI	250 ou plus	Taille hors tranche	Ensemble (20 ou plus)
Nombre d'entreprises	138,0	32	25	195
Effectif employé (milliers)	10,8	28,2	5,7	44,7
Chiffre d'affaires HT (Md€)	2,5	9,5	5,0	17,0
Exportations	0,9	4,0	3,3	8,2

L'industrie de la cosmétique continue à peser un poids non négligeable dans l'industrie française, avec 17 Md€ de chiffre d'affaires en 2007, dont quasiment la moitié réalisée à l'export [1, 4].

### Services

Parmi les services dits de support à la santé, on comprend essentiellement les *Contract Research Organizations* (CRO) et les *Contract Manufacturing Organizations* (CMO), les assurances privées et les entreprises d'e-santé, qui présentent les plus forts potentiels de croissance en termes de valeur économique.

Le marché des CMO devrait croître de 22,2 Md€ en 2009 à 33,7 Md€ en 2014 [18], les industries pharmaceutiques cherchant à réduire les coûts fixes associés aux équipements de production, particulièrement élevés dans le cas des biomolécules. Selon les sources, le marché mondial des CRO est de 15 à 19 Md€ en 2010 [13, 19, 20], dont 12 Md€ pour la recherche clinique, et devrait connaître une croissance de plus de 8 % par an. En France, 80 sociétés se partagent le marché des CRO cliniques d'environ 600 M€, dont 56 % réalisés par les filiales des groupes étrangers [13]. Des services sont par ailleurs développés autour de nouveaux modèles *in vivo* et *ex vivo*.

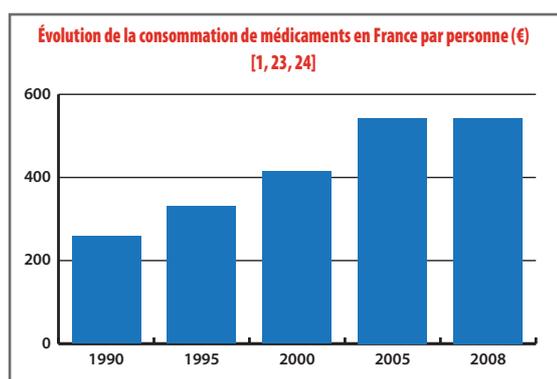
Le marché de la e-santé représente actuellement 15 à 20 Md€ en Europe et repose sur un tissu particulièrement fragmenté, avec 20 leaders industriels et pas moins de 5 000 PME opérant sur ce marché [14]. Il compte ainsi pour 2 % des dépenses de santé en Europe, alors que l'objectif qui était affiché par l'UE pour 2010 était de 5 %. En France les TIC ne représentent encore qu'1,5 % des dépenses de santé [15, 16]. Toutefois, le marché de la e-santé est amené à croître fortement parce qu'il fait l'objet d'actions dédiées de la part des autorités publiques. En effet, la e-santé est porteuse d'une forte création de valeur, en termes de développement de l'offre industrielle et de services innovants ainsi que de potentiel d'exportation. Elle permet également de diminuer les dépenses de santé, grâce au développement de l'hospitalisation à domicile en alternative aux coûts d'hospitalisation classique (56 % du budget de l'assurance maladie [17]) ou grâce à l'économie réalisée sur les transferts des patients grâce aux dispositifs de téléconsultation ou téléradiologie. Enfin, la e-santé permet véritablement l'amélioration de la qualité des soins délivrés à la population.

Les services à la personne représentent quant à eux un chiffre d'affaires en France de 15,6 Md€ en 2008 [21] contre 11 Md€ en 2005 [22].

### Enjeux globaux dans le domaine de la santé

Le secteur de la santé, aussi bien d'un point de vue industriel que de service, est en mutation profonde. En effet, les tendan-

ces démographiques et épidémiologiques font émerger de nouveaux enjeux majeurs en termes de santé publique (cancer, maladies cardiovasculaires, maladies neurodégénératives, pathologies émergentes, autonomie à domicile, etc.). Les attentes sociétales sont également de plus en plus fortes : la croissance des dépenses de santé étant supérieure à celle du PIB, il est nécessaire de gérer cette augmentation tout en maintenant la qualité et l'égalité d'accès aux soins.



Les affections longues durées (ALD) pèsent de plus en plus lourd sur les dépenses de santé. Le nombre de personnes en ALD en 2015 est estimé à 12 millions d'assurés, dont 11 millions pour le seul régime général [25], soit une hausse totale entre 2006 et 2015 de 42 %. Cette progression est principalement liée à l'augmentation de la prévalence des ALD à structure d'âge identique (pour les trois quarts), et dans une moindre mesure au vieillissement de la population (pour un quart). La projection montre que 70 % des remboursements seraient concentrés sur les ALD en 2015. En outre, la croissance des dépenses liées aux personnes en ALD compte pour plus de 80 % dans la hausse tendancielle des dépenses. Dans ce cadre, les dépenses de l'assurance maladie passeraient de 140 Md€ en 2006 à un montant de 210 Md€ environ en 2015 (données tous régimes). La gestion dans le temps du dispositif, la modification des conditions d'entrée, l'extension de la prise en compte de certains facteurs de risque, font qu'un nombre important de personnes en ALD ne sont en réalité pas exposées à des maladies « longues et coûteuses » comme le voudrait la réglementation. La Haute Autorité de santé (HAS) travaille sur les différentes évolutions possibles dans les critères d'entrée en ALD.

Devant la complexité de notre environnement, améliorer la prévention, l'observance des patients et assurer une prise en charge globale des malades devient une nécessité.

Les conséquences sont donc nombreuses sur les entreprises de santé. En ce qui concerne les médicaments, on observe un ralentissement du marché du médicament (notamment en termes de nombre de lancements de nouvelles molécules) et la part grandissante des génériques. Dans ce cadre, les entreprises françaises, et plus largement européennes, doivent faire face à un renforcement de la compétition internationale, notamment asiatique. Ainsi, tandis que l'industrie pharmaceutique a ouvert 14 sites de recherche en Asie entre 2001 et 2006, 18 ont

été fermés en Europe [3]. Les biomédicaments prennent également une part croissante : en 2012, ils représenteront 15 % des médicaments disponibles contre 10 % actuellement [6]. Qu'il s'agisse de génériques ou de biomédicaments, les industriels font face à des défis, en termes de maîtrise et de capacité de production (en direct ou par façonnage).

On observe également une accélération des évolutions technologiques, avec le développement de nouveaux outils et concepts au service de la santé, tels que le séquençage du génome humain, la pharmacogénomique, l'imagerie fonctionnelle, etc. Les processus de R&D s'en trouvent donc impactés, en étant plus transversaux, à la fois en termes d'acteurs impliqués (recherche publique, jeunes pousses, industries pharmaceutiques) que d'outils à disposition. D'autres facteurs impliquent une nécessaire évolution des processus de R&D. L'émergence de la médecine personnalisée et de la télésanté y participent également, puisqu'elles impliquent une prise en charge de plus en plus multidisciplinaire et globale des pathologies, alliant produits et services autour du patient. Les entreprises sont donc confrontées à l'évolution d'un modèle de production prévisionnelle vers celui d'une distribution à la demande, ainsi qu'à la complexification des modèles économiques, comme en témoigne la migration de certaines industries pharmaceutiques vers le diagnostic, voire vers le développement de services, ou encore vers la nutrition santé.

## Agriculture et Agroalimentaire

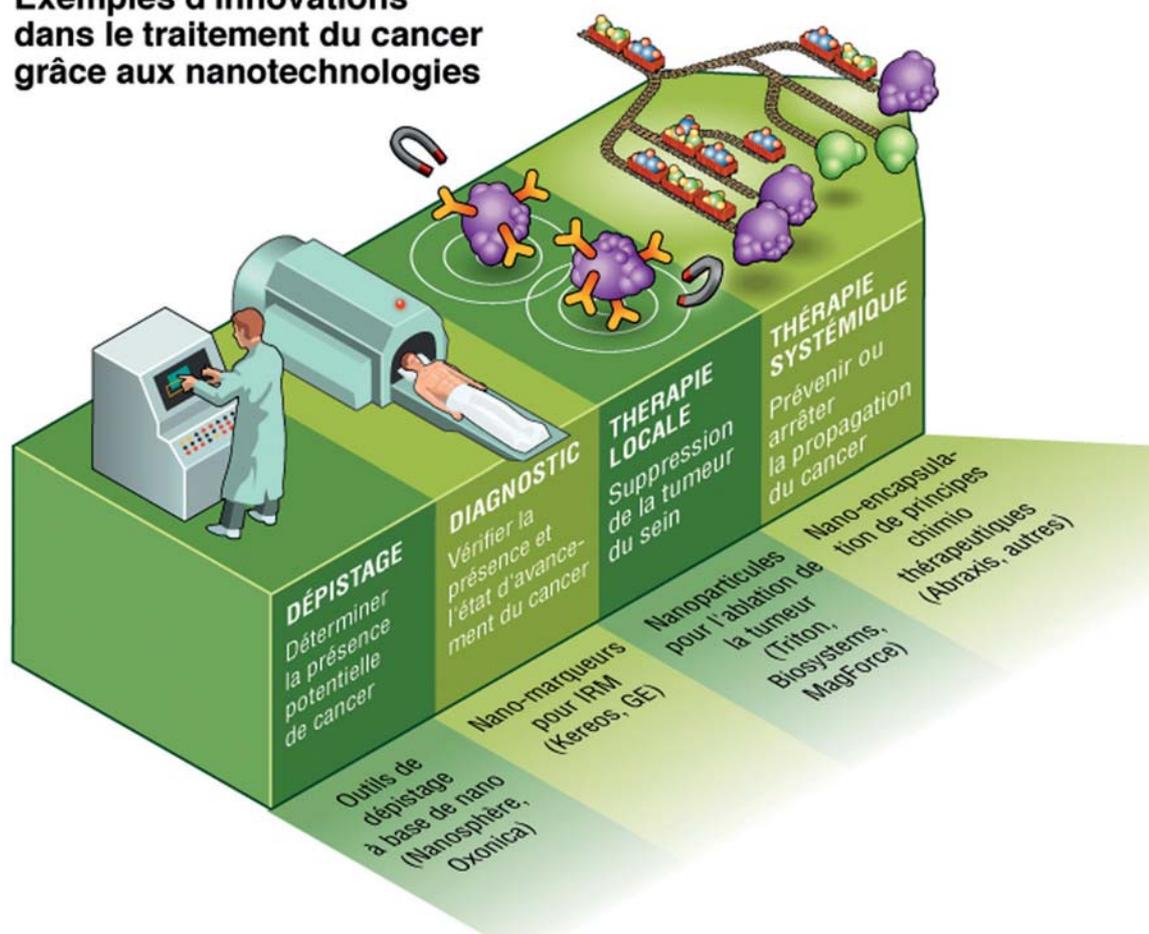
### Industrie agroalimentaire

**Chiffres clés de l'industrie agroalimentaire pour les entreprises de 20 salariés ou plus, 2007**

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises de 20 salariés et plus
Industrie des viandes	26,9	105,2	982
Industrie du poisson	2,4	10,1	121
Industrie des fruits et légumes	6,7	23,9	195
Industrie des corps gras	2,3	2,2	42
Industrie laitière	22,2	49,3	537
Travail des grains, fabrication de produits amylacés	4,6	11,0	119
Fabrication de produits de boulangerie-pâtisserie et de pâtes	7,8	40,4	390
Autres industries alimentaires	20,9	63,6	616
Fabrication d'aliments pour animaux	8,3	16,1	219
Fabrication de boissons	18,1	34,1	462
Total Industrie Agroalimentaire	120,2	355,9	3 683,0

En France, en 2007, le chiffre d'affaires du secteur atteint 163 Md€ HT [26] dont 120,2 Md€ réalisés par des entreprises de 20 salariés ou plus (voir tableau ci-dessus). L'industrie agroalimentaire occupe ainsi une place importante dans l'économie nationale : il s'agit de la première industrie française en chiffre d'affaires ; elle emploie 412 500 salariés et présente une balance commerciale excédentaire de 6,6 Md€ [26]. En revanche, le chiffre d'affaires de l'industrie agroalimentaire est en baisse, de même que l'emploi

## Exemples d'innovations dans le traitement du cancer grâce aux nanotechnologies



et le solde commercial. En effet, en 2004, les entreprises de plus de 20 salariés représentaient un chiffre d'affaires de 125,5 Md€ contre 120,2 en 2007, et employaient 386 000 salariés contre 356 000 en 2007. D'après des chiffres publiés par le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, le chiffre d'affaires 2009 serait de 150 Md€. En 2004, le solde commercial était positif à 7,5 Md€, et d'ores et déjà en baisse de 7,4 % par rapport à 2003 [27]. Les entreprises positionnées à l'export connaissent une concurrence accrue des pays émergents. Dans l'UE27, le marché de l'alimentation animale (hors animaux domestiques) est de 145 millions de tonnes, sur lesquelles la France détient 15 % de parts de marché [28]. Pourtant, la balance commerciale de la France sur l'alimentation animale est déficitaire. L'industrie agroalimentaire demeure toutefois un pilier de l'économie française, et participe avec l'agriculture à l'aménagement du territoire et à l'image de marque de la France. L'industrie agroalimentaire reste très dispersée, avec pas de moins de 10 500 entreprises dont 97 % de PME et 70 % de TPE (très petites entreprises) [29]. Ainsi, beaucoup d'entreprises n'ont pas une taille critique suffisante pour investir et aborder le marché international. Pourtant, de nombreux défis doivent être relevés. L'amont agricole est en pleine mutation, l'aval de la filière est particulièrement concentré et les industries agro-

alimentaires sont confrontées à des marges faibles du fait des rapports de force avec les distributeurs mais aussi de la volatilité des prix des matières premières. Cette situation nuit également à l'image du milieu aux yeux des consommateurs, qui ont déjà tendance à réduire la part de leur budget dédié à l'agroalimentaire. D'autre part, les exigences réglementaires sont croissantes, sont souvent plus fortes en France que dans d'autres pays, et demandent des moyens humains et financiers pour y répondre. Les entreprises doivent également lutter contre les risques de fraude et de contrefaçon.

Le degré d'innovation est plus faible comparativement à d'autres secteurs industriels. Dans l'agroalimentaire, 7 % du chiffre d'affaires est consacré à l'innovation en moyenne [29]. Moins de 1 % du chiffre d'affaires est dédié à la recherche en tant que telle. Toutefois, le secteur est propice à d'autres formes d'innovations, qui seront capitales à l'avenir : marketing, circuits de distribution, emballages, recettes, design, qualité, développement durable, services associés, etc. Des experts soulignent par exemple l'importance des stratégies mutualisées, notamment en termes de logistique et d'exportation.

Les industriels doivent également anticiper les attentes des consommateurs, elles aussi croissantes et changeantes : alimentation au service du bien-être et de la santé, produits

d'origine biologique, traçabilité et sécurité alimentaire, transparence dans la chaîne alimentaire et logistique, prise en compte de la problématique environnementale à la fois dans les procédés et dans la logistique. Au-delà des attentes des consommateurs, comprendre leurs processus de choix est également un enjeu majeur de l'agroalimentaire, d'où le recours à des outils existants, ou à venir, de type observatoire.

### Agriculture

En France, le secteur emploie, en 2009, 900 000 personnes [30], à temps plein ou partiel. Ce nombre continue de décroître, de 7 % depuis 2005 et de plus de la moitié depuis 1988, de même que le nombre d'exploitations agricoles. Les indicateurs de la santé du secteur sont tous à la baisse, et ce, depuis plusieurs années, notamment du fait de la forte baisse des prix agricoles.

Indicateurs des comptes agricoles provisoires 2009  
(source : Agreste)

	2009	Évolution 2008-2009	Évolution 2007-2008
Production agricole hors subvention (Md€)	60,6	-8,5	
Production agricole au prix de base (Md€)	63,1	-8,3	
Valeur ajoutée brute	22,2	-16,8 %	-6,8 %
Résultat agricole net		-19,6 %	-11,6 %

La France contribue pourtant toujours largement à la production européenne (à hauteur de 18 % hors subventions [21]). Au-delà de cet enjeu de résistance à la volatilité des prix, l'agriculture fait toujours face à l'enjeu d'identifier et de mettre en place les bonnes pratiques en termes d'occupation et de valorisation des territoires, de respect des ressources naturelles et de l'environnement. L'agriculture et la forêt doivent à la fois produire plus pour répondre aux besoins de la population et aux besoins croissants liés à la valorisation non alimentaire des cultures, et produire mieux pour préserver les ressources naturelles et la biodiversité. Le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche a ainsi défini un plan pour un nouveau modèle agricole : Objectif Terres 2020. Ce plan définit les axes de travail prioritaires : réduire l'usage et l'impact des produits phytosanitaires (notamment via le plan Écophyto, qui vise à réduire de 50 % l'usage des produits phytosanitaires en agriculture à horizon 2018), engager les entreprises agricoles dans le développement durable (notamment en améliorant la performance énergétique des exploitations), développer les potentialités de l'agriculture biologique, remettre l'agronomie au centre de l'agriculture et repenser des pratiques adaptées aux territoires. Les efforts doivent donc être poursuivis pour le développement d'une ingénierie de l'agriculture durable, par la mise en place de techniques alternatives de culture, de nouvelles variétés, etc., mais aussi porter sur la structuration des filières, par exemple dans le cas de l'agriculture biologique, sur la formation, sur la certification environnementale, etc.

Enfin, le soutien public de l'agriculture reste coûteux ; des débats sur le futur de la politique agricole commune (post 2013) sont notamment en cours.

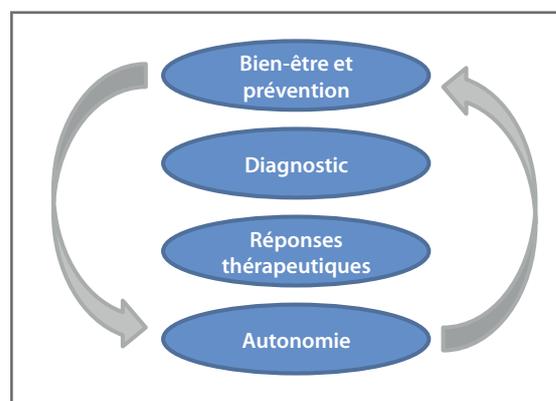
### Services

De nombreux services existent également pour l'agriculture et l'agroalimentaire : services de R&D, bureaux d'études, services de conditionnement, sociétés de distribution (nouveaux types de canaux comme ceux des paniers biologiques), services de conseil notamment en innovation.

## Les grandes tendances d'évolution du secteur

### Santé

Les enjeux dans le domaine de la santé sont repris et illustrés ci-dessous :



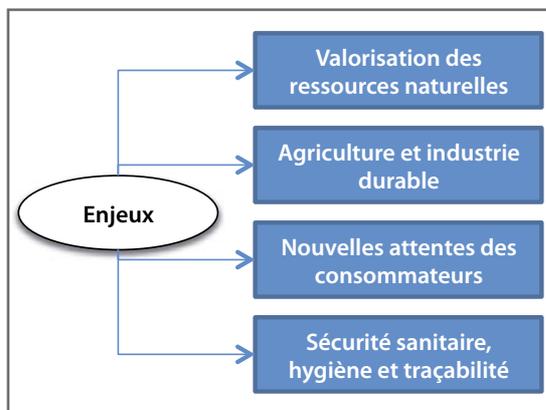
Pour répondre aux enjeux de bien-être, de prévention et d'autonomie, de nombreux produits et services vont rencontrer une demande croissante (au-delà des loisirs et de la culture). Les produits cosmétiques sont ainsi toujours recherchés par les consommateurs, et les industries développent des formulations plus innovantes, de nouveaux ingrédients apportant des fonctionnalités nouvelles, tout en étant abordables pour les consommateurs. Les produits alliant nutrition et santé (compléments alimentaires, aliments fonctionnels) ont vu leur marché se développer fortement et cette tendance devrait se poursuivre. À l'image de la cosmétique, mais aussi de la pharmacie, l'innovation passe également par l'identification et la caractérisation de nouveaux ingrédients, dont des ingrédients d'origine naturelle (ressources végétales, animales, marines), leur formulation, puis par le design des produits, leur stratégie marketing et leurs circuits de distribution. De nombreuses sociétés de service gravitent autour de ces activités, proposant leurs compétences en extraction, synthèse et caractérisation de composés, en formulation, en production à façon, en stratégie et en marketing. L'autonomie des personnes est un enjeu majeur de notre société, aussi bien pour les personnes âgées, souffrantes ou non, que pour les patients atteints de maladies chroniques ou en retour d'hospitalisation. Elle répond autant à un besoin de bien-être des personnes qu'à la nécessité de réduire les coûts de santé. Ainsi, les années à venir verront se multiplier les thérapies utili-

sables à domicile (de par leurs voies d'administration) ; des dispositifs médicaux, implantables ou non, permettant d'ajuster la délivrance de médicaments, suivre l'activité des personnes ou des paramètres biologiques et physiologiques ; des systèmes de communication entre les personnes à domicile et le personnel médical. On retrouve ainsi un large pan de la télésanté, avec notamment la télémédecine, tant en termes de produits que de services associés. De nombreuses initiatives sont en cours pour pallier les verrous actuels de la télémédecine, laissant présager d'un réel développement de l'offre dans les prochaines années. Plus largement, l'ensemble des services à la personne continuera à se développer et constituera une importante source de création d'emplois. Des dispositifs médicaux continueront à pallier les déficiences sensorielles, motrices et les handicaps de manière générale, de même que des aides techniques et des biens de consommation au design et à l'ergonomie adaptés aux populations concernées.

Le secteur du diagnostic connaît lui aussi des évolutions majeures. Les besoins sont nombreux : améliorer le diagnostic des pathologies, établir un diagnostic plus rapidement, en termes de précocité dans le processus de développement de la pathologie et de rapidité d'analyse. Les efforts des industriels portent ainsi sur l'identification de biomarqueurs spécifiques sur lesquels reposeront de futurs tests de diagnostic. De nouveaux équipements et dispositifs d'analyse seront également nécessaires, soit pour être adaptés aux biomarqueurs qui seront retenus, soit pour permettre la réalisation de multiplexages ou de diagnostics rapides dits « point-of-care ». Les avancées en imagerie, tant en termes techniques que d'interprétation, viendront également compléter l'évolution du domaine du diagnostic. Quel que soit l'outil de diagnostic, des sociétés pourront également se développer grâce à l'élaboration d'outils logiciels d'aide à la décision.

Enfin, le développement de nouvelles approches thérapeutiques se poursuit, et les années à venir verront s'établir ou se développer de nouvelles thérapies innovantes et efficaces : des thérapies ciblées (pour les cancers par exemple), des thérapies cellulaires voire géniques, des organes artificiels et des prothèses présentant une plus grande longévité et résistance, des procédures et équipements de chirurgie mini-invasive, etc. Tous ces développements permettront, d'une part, de proposer des solutions qui font défaut aujourd'hui, d'autre part, de permettre le choix parmi une palette d'outils plus adaptés à la situation de chacun, grâce aux outils de diagnostic et de thérapeutique. De nombreuses activités de service accompagnent le développement de ces outils thérapeutiques et jouent un rôle croissant dans la stratégie des industries pharmaceutiques elles-mêmes. On peut ainsi citer des services d'identification, de synthèse et de caractérisation de composés, d'essais d'efficacité et de toxicité de molécules thérapeutiques, de formulation et de production à façon, et des services en stratégie, marketing et organisation, etc. Avec le séquençage du génome, des acteurs français pourraient prendre une place de choix sur le marché de service de séquençage.

## Agriculture et Agroalimentaire



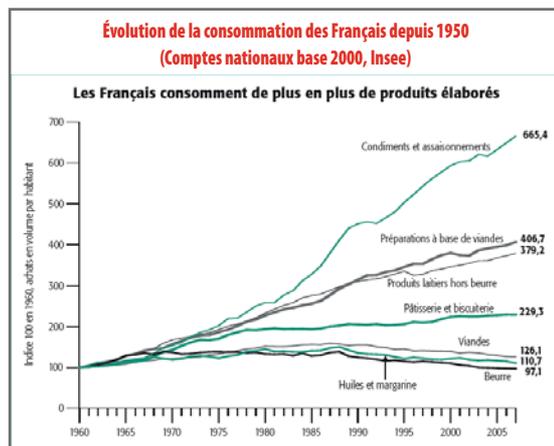
Le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche a publié une réflexion stratégique sur les dix priorités agro-industrielles de recherche et développement. De nombreux enjeux tournent autour de l'agriculture et de l'alimentaire durable.

Un premier enjeu de l'agriculture et de l'agro-industrie est d'optimiser l'usage des ressources naturelles en les valorisant, cette valorisation pouvant être à usage alimentaire ou non. S'il est entendu que certaines ressources font déjà l'objet de conflits entre usage alimentaire ou non, d'autres ressources peuvent être mieux ou davantage valorisées. La chimie du végétal permet, par exemple, d'avoir accès à de nouvelles molécules fonctionnelles. Les produits qui en sont issus servent de nombreux domaines (plasturgie, habillement, biomédical, etc.). La croissance mondiale des produits de la chimie du végétal est actuellement de 50 % par an. La chimie du végétal est davantage développée dans la section Chimie-Matériaux-Procédés. La valorisation des produits de la mer constitue également une priorité, dans le but d'optimiser les prélèvements des réserves halieutiques et d'accroître la rentabilité des acteurs de la filière. En effet, actuellement, 50 % des poissons et coquillages prélevés ne sont pas valorisés [26] et pourraient être transformés en préparations intégrées dans des produits de consommation, en produits « nouveaux » (plats préparés), recyclés dans l'élaboration d'aliments pour animaux ou valorisés pour des usages non alimentaires (déchets, peaux, etc.).

L'agriculture et l'agroalimentaire doivent également répondre à leurs propres enjeux de durabilité et de respect de l'environnement. De nombreux produits peuvent œuvrer en ce sens et font l'objet de développements. De nouvelles variétés végétales seront sélectionnées pour adapter l'agriculture au changement climatique, aux attentes de forts rendements et de faible consommation en intrants, tout en assurant une haute valeur nutritionnelle et organoleptique (il faut noter que la sélection de nouvelles variétés s'applique également aux plantes d'ornement et d'espace vert). Des produits et outils de sélection des reproducteurs existent également et se développeront encore dans diverses filières animales, soit pour préserver des races, augmenter le rendement des productions animales ou faciliter les conditions d'élevage.

Le développement d'engrais naturels et de produits de phytopharmacie se poursuivra. Des engrais naturels enrichis en micro-organismes sont ainsi prometteurs, de même que des molécules stimulant les défenses naturelles des plantes. Il est également critique de mettre au point de nouveaux aliments pour les animaux d'élevage, pour assurer la substitution des protéines animales.

Au-delà des produits qui caractériseront l'évolution du secteur de l'agroalimentaire, il faut également noter que de nouveaux procédés viendront transformer l'industrie, toujours dans une optique de durabilité : des procédés de maîtrise de l'énergie et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, d'optimisation de la consommation en eau, de prévention et de traitement des rejets et déchets. Les habitudes et choix de consommation alimentaire sont extraordinairement variables, comme le montre le graphique ci-dessous, et doivent être anticipés.



Certains produits se sont démarqués dernièrement et occupent une place de choix sur le marché, offrant ainsi des possibilités de diversification des débouchés pour les entreprises. Les *smoothies*, mélanges de fruits et de légumes mixés, soupes fraîches « micro-ondables », constituent un exemple de marché émergent. Les consommateurs recherchent également des vins plus légers, des produits de charcuterie de la mer et des produits crus (de type sushis). Les aliments fonctionnels et les compléments alimentaires resteront des produits phares, avec de nouvelles fonctionnalités recherchées, bien que la réglementation sur les allégations se durcisse. Les consommateurs sont également en demande de produits prêts à consommer. Cette demande impacte le produit lui-même, le procédé de production et le conditionnement.

Enfin, un enjeu de taille est celui de la sécurité sanitaire, de l'hygiène et de la traçabilité. Ceci impacte, entre autres, le secteur de l'emballage, avec par exemple de futurs emballages actifs capables d'interagir de façon intelligente avec un contenu agroalimentaire ou encore de contenir toutes les informations sur le produit, des films plastiques comestibles, etc. Le respect de cet enjeu passera également par de nouveaux procédés de production et d'assemblage.

## Santé, Agriculture et Agroalimentaire

Deux enjeux communs à la santé, à l'agriculture et à l'agroalimentaire doivent être soulignés : la bioproduction et le développement de biomarqueurs.

Tout d'abord, la bioproduction constitue un réel enjeu pour les industriels. L'étude « Bioproduction en 2008 : état des lieux et recommandations pour l'attractivité française » conduite conjointement par le LEEM et le Génopôle, souligne que la part des biomédicaments dans l'industrie pharmaceutique passera de 10 % à plus de 15 % entre 2007 et 2012. Actuellement, les capacités mondiales de bioproduction sont estimées entre 3 et 3,5 ML, dont 30 % en Europe. La France est très en retard, avec à titre d'exemple seulement 1 % de la capacité de bioproduction en cellules mammifères en Europe (contre 55 % en Allemagne) [20, 31, 32]. Au-delà des biothérapies, la bioproduction constitue également un enjeu clé pour les industries agroalimentaires, pour la production de nouveaux ingrédients par exemple. Le développement de la bioproduction dépend de nombreuses technologies. Le choix a été fait de ne pas retenir les technologies pour la bioproduction comme clés en tant que telles. Toutefois, certaines technologies retenues ont pour application la bioproduction et tiennent ainsi en compte cet enjeu particulièrement crucial.

Les biomarqueurs ouvrent de nouvelles perspectives en biologie. Ils peuvent être utilisés pour mieux comprendre les mécanismes associés à une pathologie, découvrir de nouveaux médicaments, tester l'efficacité et la toxicité de nouveaux traitements, stratifier les patients, mettre au point de nouvelles stratégies de diagnostic, etc. Dans l'agroalimentaire, les biomarqueurs permettent non seulement de soutenir et démontrer des allégations nutritionnelles et de santé mais ils peuvent également être utilisés pour la sélection végétale. Plus largement, ils accompagnent une meilleure compréhension des phénomènes biologiques et de toutes les applications qui en découlent. L'identification et le développement de biomarqueurs font appel à un faisceau multiple de technologies et disciplines : génomique, protéomique, métabolomique, technologies d'analyse etc. Dans cette étude, les biomarqueurs ont été considérés comme des applications de technologies retenues comme clés, compte tenu de la diversité des outils au service des biomarqueurs.

## Les tendances technologiques et les technologies clés

De très nombreuses technologies et outils sont nécessaires pour le développement des produits et services servant les enjeux à venir. On distingue tout d'abord des technologies servant des thèmes centraux à toutes les disciplines du vivant et pour lesquelles des avancées scientifiques et techniques considérables ont permis d'apporter de nouveaux outils et concepts : la génomique, la transcriptomique, les microRNA, la protéomique et

la métabolomique. Leur utilisation sera un prérequis pour de nombreuses recherches : meilleure compréhension des mécanismes moléculaires et cellulaires, des liens entre une molécule ou un aliment et des fonctions biologiques, identification de nouvelles cibles moléculaires et de biomarqueurs, etc. La plupart de ces technologies n'ont pas été retenues comme clés pour plusieurs raisons : d'une part, il s'agit pour la plupart d'approches méthodologiques arrivant à maturité, d'autre part, l'enjeu réside surtout dans la traduction des connaissances sur le génome et des données « -omiques » en résultats cliniques. Par ailleurs, les technologies utilisées sont aujourd'hui essentiellement américaines (Affimetrix, Agilent, Illumina). Les acteurs français ont en revanche une carte à jouer en termes d'utilisation de ces outils (structuration de plateformes, savoir-faire) et de services de génotypage.

Ce sont davantage les données générées par les approches haut débit et « -omiques » qui sont sous-exploitées. Ceci s'explique en grande partie par le manque de moyens dans les domaines de l'informatique et de la bio-informatique, celle-ci étant définie comme l'ensemble des approches algorithmiques, statistiques et mathématiques permettant d'une part de traiter les données et d'autre part de modéliser la dynamique des réseaux biologiques complexes et des structures moléculaires. Par ailleurs, les approches in silico pour assurer le criblage virtuel et prédire l'ADME (Absorption, Distribution, Métabolisme et Elimination) et la toxicité des molécules sont également un relié. Les technologies pour le calcul intensif ont ainsi été retenues comme clés et traitées dans la section TIC. La simulation moléculaire a également été retenue comme clé et est traitée dans la section Chimie-Matériaux-Procédés.

Parmi les technologies dites transversales figurent également les nanotechnologies appliquées à la biologie. Elles permettent d'apporter une dimension nouvelle pour l'étude de molécules biologiques et de leurs modes d'actions, de nouveaux vecteurs et formes galéniques. Les nanopuces, nanoréacteurs et autres outils miniaturisés permettent de caractériser des propriétés et interactions de molécules sans avoir à les produire à grande échelle, d'étudier des molécules uniques, de développer des systèmes automatisables voire autonomes. Les nanotechnologies constituent ainsi une technologie clé, qui est traitée dans les sections Chimie-Matériaux-Procédés et TIC de ce document.

L'ensemble des enjeux des secteurs de la santé, de l'agriculture et de l'agroalimentaire, peuvent être synthétisés en quatre grands enjeux :

- le bien-être des personnes, la prévention et la sécurité sanitaire ;
- la bioproduction ;
- la meilleure prise en charge des patients ;
- l'agriculture et l'alimentaire durable.

Le schéma ci-contre explicite les technologies clés retenues en fonction de leurs réponses aux enjeux ci-dessus.

Ingénierie cellulaire et tissulaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bioproduction</li> <li>• Meilleure prise en charge des patients</li> </ul>
Ingénierie génomique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bioproduction</li> <li>• Meilleure prise en charge des patients</li> <li>• Agriculture et alimentaire durables</li> </ul>
Ingénierie du système immunitaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire</li> <li>• Meilleure prise en charge des patients</li> </ul>
Technologies pour la biologie de synthèse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bioproduction</li> <li>• Meilleure prise en charge des patients</li> <li>• Agriculture et alimentaire durables</li> </ul>
Systèmes bio-embarqués	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure prise en charge des patients</li> <li>• Agriculture et alimentaire durables</li> </ul>
Technologies pour la maîtrise des écosystèmes microbiens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire</li> <li>• Agriculture et agroalimentaire durables</li> </ul>
Capteurs pour le suivi en temps réel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire</li> <li>• Meilleure prise en charge des patients</li> <li>• Agriculture et agroalimentaire durables</li> </ul>
Technologies de diagnostic rapide	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire</li> <li>• Meilleure prise en charge des patients</li> <li>• Agriculture et agroalimentaire durables</li> </ul>
Technologies pour l'imagerie du vivant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire</li> <li>• Meilleure prise en charge des patients</li> </ul>
Technologies douces d'assainissement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire</li> <li>• Agriculture et agroalimentaire durables</li> </ul>

Par ailleurs, d'autres technologies s'ajoutent aux technologies ci-dessus pour développer ou proposer des produits ou services complets.

Au-delà des technologies de calcul intensif, de simulation moléculaire et des nanotechnologies, d'autres technologies relevant des TIC (et figurant dans la section correspondante) sont clés et desservent les secteurs de la santé, de l'agriculture et de l'agroalimentaire :

- logiciel embarqué et processeurs associés ;
- nanoélectronique ;
- optoélectronique ;
- interfaces homme-machine ;
- technologies 3D ;
- sécurité holistique (notamment des données et de leur transfert) ;
- objets communicants ;
- technologies réseaux sans fil ;
- portail, collaborations et communications unifiées ;
- robotique.

À titre d'exemple, de nouvelles technologies chirurgicales et interventionnelles sont attendues. La robotique a ainsi été retenue comme une technologie clé, notamment pour ses applications médicales : nouveaux outils interventionnels miniaturisés pour des gestes et actes chirurgicaux, systèmes de manipulation et de télémanipulation à distance.

## Technologies relevant des sciences économiques, humaines et sociales

En dehors des technologies dites « dures », le domaine des technologies « molles », relevant des SES et SHS (sciences économiques, humaines et sociales) et d'autres formes d'innovation, doit également être souligné puisque participant à part entière aux enjeux à venir.

Tout d'abord, il existe des besoins forts sur des thèmes très globaux tels que la santé publique, la production alimentaire durable et la gestion de la chaîne alimentaire. Ces thèmes de

recherche nécessitent une forte interdisciplinarité : épidémiologie, médecine, démographie, sociologie, psychologie, économie, géographie, anthropologie, neurosciences, etc.

La recherche en santé publique est indispensable à l'élaboration des recommandations pour la pratique médicale, au fonctionnement du système de santé et à l'établissement des politiques publiques dans ce domaine. Plusieurs champs de recherche sont clés et ont ainsi été retenus par l'Institut Santé publique :

- le champ santé-environnement-travail-modes de vie, afin de répondre aux nouveaux défis sanitaires résultant des transformations de l'environnement (physiques, chimiques, biologiques et sociales) et de celles des modes d'organisation socio-économiques ;
- le champ de la recherche sur les handicaps et l'autonomie, dans toutes leurs dimensions (épidémiologie, démographie, conditions de vie, politiques du handicap et leur mise en œuvre, place des usagers, etc.) pour faire face au vieillissement démographique et à l'augmentation de la prévalence des maladies chroniques ;
- le champ de recherche sur les politiques de santé et les enjeux sociaux de la médecine, afin de répondre aux multiples défis issus de la transformation des savoirs et des pratiques dans ces domaines ;
- le champ de la santé reproductive, de la santé des enfants et des adolescents (problématiques de développement, comportementales, environnementales et familiales) ;
- le champ de l'urgence sanitaire : réponses à l'émergence de maladies nouvelles, aux alertes et aux situations de crise, à la mondialisation et au changement climatique ;
- le champ de la prévention (addictions, éducation nutritionnelle), de l'analyse des services de santé et des pratiques de santé (transformations affectant les services de santé, évolutions des pratiques, nouveaux acteurs, intégration des innovations). Des recherches sont également nécessaires sur la production alimentaire durable et la gestion de la chaîne alimentaire, avec des axes de recherche à conduire, tels que :
- le développement de méthodologies décrivant les paramètres essentiels de durabilité du système d'approvisionnement alimentaire ;
- le développement d'outils de modélisation dynamique pour déterminer et démontrer les frontières en termes de durabilité entre les différents modes de production ;
- l'élaboration de modèles décrivant les chaînes des matières premières biologiques et alimentaires en Europe, pour montrer la durabilité des différentes chaînes d'approvisionnement dans le contexte européen global ;
- l'identification des facteurs qui à l'avenir affecteront ou amélioreront la durabilité des différents systèmes de production et des chaînes de valeur et, de là, l'élaboration de scénarios intégrant les changements démographiques, économiques, politiques, environnementaux, etc. ;
- l'identification et l'analyse des pressions environnementales, sociales et économiques s'exerçant sur la production alimentaire primaire et donc impactant la durabilité de la chaîne alimentaire et, de là, l'identification d'options pour gérer ces pressions et améliorer la durabilité ;



- l'analyse et l'optimisation des systèmes de production durables en prenant en compte les dimensions paysagères et de qualité de vie ;
  - l'analyse et le suivi des tendances des modes de vie, telles que l'utilisation d'énergie, d'eau et le recyclage des déchets, ainsi que les modes de consommation alimentaires et d'achat (en particulier l'importance accordée à la durabilité des produits consommés) ;
  - l'étude des opportunités d'innovations et d'améliorations dans les processus organisationnels tout au long de la chaîne de valeur ;
  - l'analyse et l'élaboration de modèles organisationnels alternatifs, combinant efficacité et réactivité, aux demandes changeantes des consommateurs ;
  - la compréhension et la cartographie des besoins de traçabilité et de transparence des entreprises, de la chaîne de valeur dans son ensemble et des consommateurs ;
  - la compréhension fine des besoins d'intégration et des barrières à l'intégration des PME dans la chaîne de valeur ;
  - la modélisation d'approches pour une coopération fonctionnelle au sein des réseaux de PME.
- De plus, les sciences de la vie et leur manipulation soulèvent de nombreuses questions d'éthique et d'acceptabilité par la population, comme il sera détaillé pour chacune des technologies clés.

Il est ainsi crucial que des spécialistes des sciences humaines et sociales développent des recherches spécifiques sur ces questions pour proposer aux acteurs du domaine et aux politiques publiques des clés pour répondre à ces questions et ainsi permettre le développement et la diffusion des technologies.

## Analyse de la position de la France

### Compétences et positionnement

La France a un historique fort dans le domaine des sciences de la vie. On compte ainsi 30 000 chercheurs et enseignants-chercheurs de la recherche publique en sciences de la vie, soit 30 % des effectifs totaux de la recherche publique.

Globalement, la France dispose d'atouts scientifiques, industriels et médicaux. Le savoir-faire d'excellence de la recherche publique en sciences du vivant est un facteur clé de compétitivité pour les entreprises françaises et d'attractivité du territoire, d'autant plus que ces compétences et savoir-faire peuvent servir les besoins de la demande au niveau mondial. Il faut toutefois souligner une érosion de la position de la France. Par ailleurs, la France a une réelle culture des mathématiques appliquées et a donc de solides compétences en termes d'ingénierie, de bases de données et de télécommunications sécurisées, nécessaires notamment pour les dispositifs médicaux, la modélisation et la e-santé. Néanmoins, il serait nécessaire de rapprocher les formations cliniques, biologiques et en sciences de l'ingénieur au niveau académique, mais aussi et surtout au niveau des entreprises.

### Production scientifique

L'analyse des indicateurs établis par l'Observatoire des sciences et techniques (OST) montre que la production scientifique en sciences du vivant est relativement faible quantitativement, mais avec une qualité croissante (croissance de 6 % de l'indice d'impact entre 2001 et 2006 [33]) bien qu'avec un indice d'impact plus faible que celui des principaux pays européens concurrents. Si la part mondiale des publications scientifiques (au global) connaît une érosion depuis 1993, en France, la recherche biomédicale a été particulièrement affectée, passant de 5,6 % en

1999 à 4,4 % en 2005 (soit une baisse plus forte qu'aux États-Unis, en Allemagne et au Royaume-Uni). Entre 2001 et 2006, la part mondiale des publications scientifiques de la France en sciences de la vie a baissé de 17 % (baisse de 15 % en biologie fondamentale, de 17 % en recherche médicale, de 20 % en biologie appliquée-écologie [26]). Cette baisse reflète le développement rapide de la recherche dans de nombreux pays en émergence scientifique.

D'après les analyses menées par le groupe de travail de la stratégie nationale de recherche et d'innovation (SNRI), la situation est très contrastée entre les sous-disciplines des sciences du vivant. Par rapport à l'Europe, la France a un nombre de publications relativement plus élevé en microbiologie – immunologie, biochimie et génétique. En revanche, le nombre de publications françaises est relativement plus faible en bio-ingénierie, neurosciences – sciences comportementales, reproduction – biologie du développement, agro-alimentaire. L'indice d'impact relatif est faible en santé publique, mais bon en écologie et fort en agroalimentaire et agriculture – biologie végétale. L'indice d'impact et l'indice de spécialisation sont faibles pour la bio-ingénierie alors qu'il s'agit d'une composante importante pour relever le défi de la biologie synthétique.

Dans le domaine des technologies pour la santé, la part mondiale des publications françaises oscille entre 5,2 % et 6 %, comme le montre le tableau ci-dessous (selon la méthodologie de l'institut Technologies pour la santé).

Part mondiale des publications françaises en technologies pour la santé

	2006-2007
Imagerie	6,04 %
Biotechnologies	5,29 %
Médicament	5,23 %
Chirurgie	5,80 %

### Analyse des brevets

En 2006, la recherche publique française a déposé 21,6 % [34] des brevets européens dans le domaine pharmacie-biotechnologie, proportion la plus élevée de tous les secteurs.

L'analyse de la part mondiale des brevets européens montre une forte spécialisation dans le domaine pharmacie-cosmétique et une « déspecialisation » en biotechnologie, celle-ci n'étant plus réelle en analysant les brevets pris aux États-Unis.

Indicateurs de l'OST relatifs à la production scientifique pour l'ensemble des sciences du vivant

	Part Monde (%)		Part dans UE (%)		Indice de spécialisation / Monde		Indice d'impact relatif*	
	2007	Évolution**	2007	Évolution**	2007	Évolution**	2007	Évolution**
France	4,1	81	11,7	87	0,95	98	0,98	109
Allemagne	6,1	88	17,7	95	1,04	105	1,07	109
Royaume-Uni	7,2	84	20,8	90	1,19	103	1,12	108

\* Part mondiale des citations reçues par les publications françaises en deux ans / part mondiale des publications françaises

\*\* Mesure de l'évolution de la valeur de l'indicateur entre 2001 et 2007 en base 100 pour 2001

## Dispositifs d'accompagnement

Les politiques publiques participent au financement de la recherche, avec notamment 3Md€ de la mission interministérielle pour la recherche et l'enseignement supérieur pour les sciences du vivant et 870 M€ apportés à la recherche clinique par le ministère de la Santé [26]. Par ailleurs, le programme investissements d'avenir permettra de lever certains freins. Avant la mise en place de ce programme, la comparaison des investissements publics consacrés aux sciences de la vie et de la santé soulignait un fort déficit en France. Ainsi, le seul budget des National Institutes of Health (NIH) américains représentait un investissement public de plus de 60 € par an par habitant, contre environ 25 € en France pour l'ensemble des organismes de recherche membres d'Aviesan [26].

Si la France dispose d'un dispositif de soutien à l'innovation performant, avec le crédit impôt recherche (CIR), le statut de jeune entreprise innovante (JEI) et Oséo notamment, la difficulté majeure des entreprises (des jeunes pousses aux ETI) dans le domaine des sciences de la vie est celle du financement. Ce problème est exacerbé dans la filière santé puisque les temps de développement sont très longs et le niveau de risque est particulièrement élevé. Cette difficulté reste vraie, malgré la mise en place d'InnoBio, fonds d'investissements pour les industries des biotechnologies, dans lequel le fonds stratégique d'investissement (FSI) a injecté 140 M€.

Au niveau européen, le 7<sup>e</sup> programme-cadre de recherche et développement (PCRD) consacre un budget annuel de plus de 1 Md€ aux sciences du vivant.

Au-delà des dispositifs de soutien financier, de nombreux dispositifs accompagnent la recherche et notamment la recherche collaborative : les pôles de compétitivité positionnés sur les axes technologiques d'intérêt pour la santé, l'agriculture, l'agroalimentaire, les instituts fédératifs de recherche, les génopôles, les cancérôles, les syndicats et associations professionnels (LEEM, Snitem, etc.). L'alliance nationale pour les sciences de la vie et de la santé constitue également désormais un dispositif de référence.

Les politiques de santé, agricoles et industrielles influencent fortement le marché et les industries. Dans le cas des politiques agricoles et industrielles, les subventions et mesures incitatives constituent d'autres formes de dispositifs d'accompagnement. Il existe également en France un dispositif national de soutien à l'export pour les industries agroalimentaires. En revanche, les dispositifs type CIR ne sont pas ou peu applicables ni à l'industrie agroalimentaire ni aux formes d'innovations qui y sont mises en œuvre.



## Recommandations

Les sciences de la vie constituent un des trois axes stratégiques de la SNRI. Il est ainsi critique de mettre en œuvre des actions permettant à la France de conquérir une position de leader sur ces secteurs.

Les sciences de la vie ont de fortes spécificités, dont des temps de développement particulièrement longs, des investissements en conséquence et des risques élevés. Les dispositifs actuels ne couvrent que des périodes de cinq ans au maximum. Les phases cliniques ne sont pas éligibles aux financements de la Commission européenne à partir de la phase IIb. L'enjeu est donc d'établir un véritable continuum des aides à l'innovation pour les sciences de la vie, et de couvrir en particulier les dernières étapes, qui sont d'une part, les plus coûteuses et d'autre part, les plus risquées, suscitant des réticences de la part d'investisseurs privés. Il pourrait ainsi être envisagé d'adapter le dispositif InnoBio en prenant en compte des échelles de temps plus longues. Il peut être également utile que l'État ait des actions plus fortes sur les fonds propres des gazelles en sciences de la vie. L'accessibilité à certains dispositifs pourrait être conditionnée à la future mise en bourse des entreprises. L'entrée au capital par l'État (par exemple via le FSI) serait également bénéfique, et aurait un effet de levier sur l'entrée au capital d'investisseurs privés. Par ailleurs, les critères d'éligibilité aux dispositifs de soutien à l'innovation ne permettent pas toujours l'accès des entreprises agroalimentaires à de tels soutiens. Il serait ainsi nécessaire de travailler à nouveau sur les critères d'éligibilité, par exemple au CIR, pour que ces entreprises, et notamment les PME, puissent en bénéficier. Le tissu agricole et agroalimentaire étant très vaste, il est difficile de couvrir l'ensemble du tissu. Des réflexions pourraient être menées sur l'amélioration du transfert des informations vers les entreprises. Les outils de type plateforme (d'in-



novation, de démonstration) sont bien adaptés aux enjeux de l'agriculture et de l'agroalimentaire et peuvent donc être davantage mis au service de ces secteurs.

La création des pôles de compétitivité a permis de mettre au cœur de la recherche la collaboration entre acteurs de diverses natures. De tels encouragements doivent être poursuivis, et pourraient également être élargis à d'autres formes de mutualisation : accès mutualisé à des outils de production, des équipements spécifiques, sans nécessairement être corrélés à des projets collaboratifs. Ceci est particulièrement vrai pour le développement de centres de bioproduction par exemple. Le soutien des politiques publiques est parfaitement adapté pour le développement de tels outils et infrastructures mutualisés. Pour développer l'attractivité de notre territoire (vis-à-vis de l'extérieur mais aussi des composantes nationales), la France doit viser le plus haut niveau technologique : vecteurs de seconde génération, dispositifs médicaux de type implantables, etc. sans viser à rattraper son retard sur les premières générations. Par ailleurs, l'accélération des développements technologiques n'a pas toujours été suivie par la mise en place de formations appropriées. Il serait ainsi nécessaire de développer des formations pluridisciplinaires, en bioproduction par exemple, ou encore sur le champ TIC et santé, pour former les futurs ingénieurs et techniciens aux compétences transverses et franchir le cloisonnement actuel entre les disciplines.

D'autres facteurs participent également à l'attractivité. Les sciences de la vie sont particulièrement concernées par les questions d'éthique et d'acceptabilité par la société. La société française est elle-même particulièrement sensible aux développements à venir et à la manipulation du vivant. Il est donc crucial que les politiques publiques engagent et poursuivent les réflexions sur ces questions, en mettant autour de la table aussi bien des membres de la société que des industriels ou des

chercheurs en sciences de la vie humaines et sociales. Pour être dans le peloton de tête de l'innovation dans ces domaines, la France doit faire en sorte que son marché accueille favorablement les avancées technologiques et leurs acteurs et incite les chercheurs et développeurs à poursuivre leur activité sur son territoire, tout en attirant les meilleures compétences mondiales. En cohérence avec l'éthique et l'acceptabilité, la France doit avoir un rôle de leader sur les questions normatives, juridiques et législatives relatives aux nouvelles technologies en sciences de la vie, et en particulier sur le plus haut niveau technologique pour lequel la France a une carte à jouer. En effet, être le premier à mettre en place des normes et standards élevés permet de conserver une longueur d'avance sur les concurrents, mais aussi de diffuser ce niveau d'exigence dans les autres pays (et ainsi éviter d'avoir des niveaux d'exigence tellement différents que les acteurs français en deviennent pénalisés).

Les politiques publiques doivent également œuvrer au développement de la recherche translationnelle, pour encourager les réflexions métiers et le développement de produits en réponse à de futurs usages. Si les instituts hospitalo-universitaires (IHU) auront de tels objectifs, d'autres types de structures doivent également être encouragées en ce sens, telles que des centres d'investigation translationnelle. À titre d'exemple, plus de 90 % des biomarqueurs sont utilisés en R&D sans jamais être retrouvés en biologie médicale. Les acteurs ne s'engagent pas suffisamment dans une démarche inscrite dans la valeur d'usage. L'enjeu est de réfléchir et de mettre en place de véritables pratiques de *data mining*, *data management*, des processus de validation et d'accès aux marchés.

Plus largement, il faut poursuivre le soutien d'outils de démonstration et de validation. Les plateformes d'innovation, les appels à projets dans le cadre du programme investissements d'avenir, sont autant d'outils propices à cela. Il conviendrait par ailleurs encourager la mise en place de registres de données exhaustifs pour permettre le développement des produits et services répondant aux enjeux mentionnés précédemment. Il faudrait également réfléchir aux modalités d'accès des structures (telles que les hôpitaux) aux prototypes innovants et, dans le cas des hôpitaux, définir des nomenclatures adaptées.

Au global, les politiques publiques ont un rôle clé à jouer dans la structuration des forces de recherche et d'innovation françaises. En effet, celles-ci se caractérisent souvent par un manque de coordination, ou par un manque d'interdisciplinarité. Pour autant, le futur des débouchés des sciences de la vie réside en grande partie dans la convergence d'outils certes biologiques mais également physiques, informatiques etc. Il devient ainsi crucial de favoriser l'interdisciplinarité au service des futurs produits et services. Là encore, le programme des investissements d'avenir est très propice pour cela, de même que la mise en place d'appels à projets dédiés à certains axes.



## 76. Ingénierie cellulaire et tissulaire

### Définitions

L'ingénierie cellulaire couvre l'ensemble des technologies permettant de produire et d'entretenir des modèles cellulaires, d'optimiser les conditions de culture, de réaliser des transfections et des transplantations et de contrôler les lignées cellulaires. L'ingénierie tissulaire applique les principes de l'ingénierie et des sciences de la vie afin de développer des substituts biologiques qui vont restaurer, maintenir ou améliorer la fonction des tissus.

L'ingénierie cellulaire et tissulaire implique des compétences pluridisciplinaires : science des matériaux, biologie cellulaire, chimie, physique et biomécanique. Ingénieries cellulaire et tissulaire sont intrinsèquement liées : l'ingénierie tissulaire passe par exemple par la combinaison de cellules, de matériaux d'ingénierie et / ou de facteurs biochimiques appropriés. Elles desservent toutes deux le développement de la médecine régénératrice, mais aussi la production de molécules d'intérêt.

### Description

La recherche dans le domaine de l'ingénierie tissulaire a beaucoup évolué et il est aujourd'hui possible de reconstruire des tissus humains complets tels que la peau, le cartilage et les ligaments. Les recherches récentes portent sur les biomatériaux comme supports de cellules afin de régénérer des tissus là où l'utilisation seule de biomatériaux n'est pas suffisante. Il s'agit alors d'associer une matrice synthétique biomimétique ou naturelle à des cellules capables de produire, au sein de ces structures, leur propre matrice extracellulaire qui pourra se substituer à ces biomatériaux.

Dans ce cas mais aussi dans celui de l'ingénierie cellulaire en général, les cellules peuvent être autologues (provenant de l'organisme receveur lui-même) ou allogéniques (provenant d'un organisme compatible). Il peut également s'agir de cellules différenciées ou de cellules souches. Les recherches s'orientent davantage sur les cellules souches adultes et embryonnaires, du fait de leurs deux propriétés principales : l'autorenouvellement – elles peuvent se multiplier et donner de nouvelles cellules souches – et la différenciation – elles peuvent produire des cellules spécialisées.

Des verrous technologiques forts subsistent :

- meilleure maîtrise et compréhension des techniques de différenciation cellulaire ;
- développement de dispositifs de transferts des cellules selon les applications ;
- adéquation des propriétés de surface, de dégradabilité, de visco-élasticité, etc. des cellules souches qui se retrouvent dans un environnement tridimensionnel, biochimique et/ou mécanique auquel elles doivent s'adapter ;
- amélioration du taux de survie des cellules implantées, notamment grâce aux nanobiotechnologies et plus largement aux techniques de vectorisation ;
- transformation des cellules en culture en objets industriels dans le but d'une production normée et contrôlée ;
- favorisation de l'approche systématique, notamment par la voie allogénique.

### Applications

L'ingénierie cellulaire et tissulaire trouve des applications dans de nombreux secteurs. En santé, la thérapie cellulaire possède un champ d'application vaste : d'intenses développements cliniques existent en immunoncologie, cardiovasculaire, orthopédie, SNC, diabète et peau. Aujourd'hui, une quarantaine de produits est commercialisée dans le monde mais le marché mondial de la thérapie cellulaire et tissulaire est amené à croître et à atteindre 2,7 Md\$ en 2015 [35].

Les cellules souches constituent par ailleurs des outils de recherche permettant d'améliorer la compréhension des facteurs de croissance et de prolifération des cellules. Elles sont également utilisées dans les fécondations *in vitro* vétérinaires.

De plus, l'ingénierie cellulaire et tissulaire permet de développer de nouveaux systèmes de bioproduction, pour tout type de biothérapies mais aussi d'ingrédients utilisables en agroalimentaire ou en cosmétique (à partir de cellules végétales par exemple) et de vecteurs. La maîtrise de l'ingénierie cellulaire et tissulaire est porteuse d'activités de services de bioproduction, de logistique (transport, stockage, conservation) et de galénique.

### Enjeux et impacts

De nombreux enjeux subsistent sur les aspects réglementaires et éthiques. Au niveau européen, le règlement « médicaments de thérapie innovante », entré en vigueur en 2008, a pour objectif l'harmonisation des législations d'ici à 2012, mais les réglementations restent strictes et peu claires. Il reste des difficultés d'acceptabilité morale, éthique ou religieuse, même si des progrès ont été accomplis.

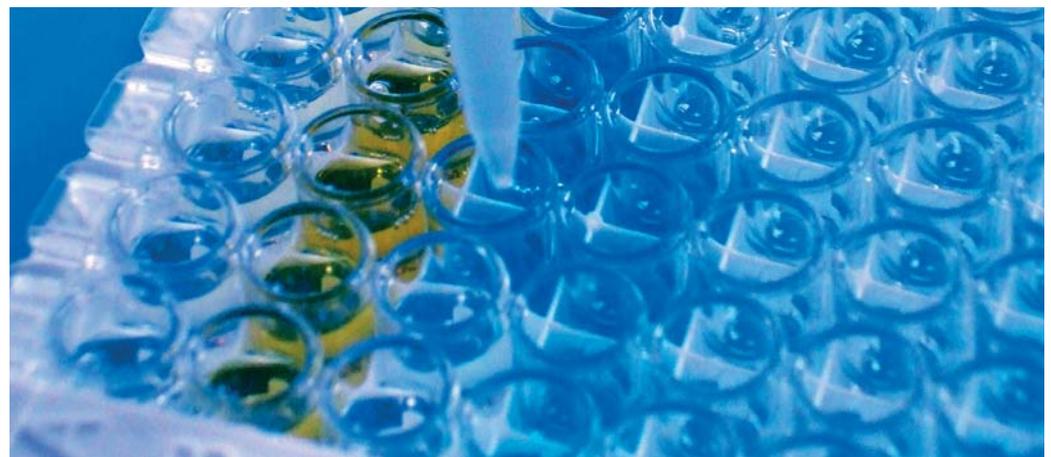
Les industriels sont également confrontés à des difficultés de mise en place d'essais (très longs et coûteux), à la complexité du *business model* (pas de vision sur le retour sur investissement, notamment du fait de la complexité logistique), à des problématiques de prix et de remboursement, en particulier face à la concurrence de thérapies « plus simples » (telles que les thérapies ciblées) et à la question de la brevetabilité.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Laboratoires de recherche académique** : AFM, CEA (LTCC, Mircen, LICB), Centre de Primatologie de Brétigny, CHU Hôtel Dieu Nantes, CNRS (CRRET, IPBC), Généthon, Hôpital Necker, Hôpital Saint-Louis, IGBCM, Inra (UMR0792 LISBP), Inserm (UTCG de Nantes, U891), Institut Cochin, Institut Curie, Institut de Biothérapies, Institut de Recherche Biologique, Institut du Thorax, Institut Pasteur, IRB, I-STEM, Laboratoires Genévrier
- **Utilisateurs** : AP-HP (Georges Pompidou, Pitié-Salpêtrière), EFS, Hôpital d'instruction des armées Percy (HIA Percy)
- **Industriels** : ABCell-Bio, Atlantic Bone Screen, Collectis, CellProthera, Clean'Cells, Diana Ingrédients, EctyCell, EndoCells, Episkin, ERYtech Pharma, Genévrier, GenoSafe, Icelltis, MAbgène, Mabio International, Myosix, Natural Implant, Neuronax, Sanofi-Aventis, ScarCell Therapeutics, TBF, Texcell, TxCell, Vivalis
- Structures relais : Atlanpole Biotherapies, Cancer-Bio-Santé, EFS, Medicen

### Principaux acteurs étrangers

- **Laboratoires de recherche académique** : California Institute for Regenerative Medicine, Harvard Stem Cell Institute, Hospital Clinic de Barcelona, McGowan Institute for Regenerative Medicine, University of Wisconsin Stem Cell and Regenerative Medicine Center, Wake Forest Institute for Regenerative
- **Industriels** : Advanced Cell Technology, Artelis, AstraZeneca, Bresagen, Cythera, Geron, GSK, Johnson & Johnson, Nestlé, Novartis, Osiris Therapeutics, PAA, Pfizer, Roche, Theregen, TiGenix, ViaCyte

## Position relative de la France

La France figure parmi les acteurs majeurs du domaine de la thérapie cellulaire. Elle a été pionnière dans l'application dans les cellules de sang de cordon ombilical et elle se distingue également dans les cellules souches mésenchymateuses et dans les cellules souches adultes. En 2007, le pays est le deuxième pays européen en termes de développement clinique de produits de thérapie cellulaire. La France est également le troisième pays au monde à réaliser des essais cliniques (derrière les États-Unis et l'Allemagne). La France est le premier pays à avoir avancé sur les normes et sera le premier à établir les standards normatifs.

Malgré tout, la France manque d'une masse critique de compétences et d'industriels et la concurrence internationale est déjà très intense, particulièrement aux États-Unis. Par ailleurs, le secteur français ne possède pas de fonds dédiés.

## Analyse AFOM

### Atouts

Fortes compétences ; acteur notable dans les essais cliniques ; présence de groupes de patients du type AFM ; impact sur les normes ; existence de l'ATU (autorisation temporaire d'utilisation), exception mondiale ; existence d'un appel à projets de l'ANR sur les cellules souches.

### Faiblesses

Peu d'industriels (dix sociétés principales de produits de thérapie cellulaire) ; faibles investissements.

### Opportunités

Harmonisation européenne de la réglementation ; avancées sur les questions d'éthique ; découverte des iPS création en janvier 2009 du Comité pour les thérapies innovantes (CAT) de l'EMA.

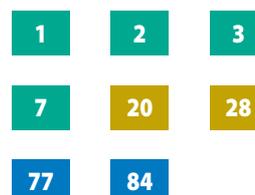
### Menaces

Forte concurrence des États-Unis ; brevetabilité ; dimension sociale.

## Recommandations

- Poursuivre le travail sur les lois de bioéthique, les dimensions sociales et la brevetabilité.
- Donner les moyens à la France pour qu'elle soit le premier pays à établir des standards et normes notamment en production (déjà une longueur d'avance), pour donner un avantage compétitif majeur aux industries françaises.
- Soutenir les initiatives pour développer une masse critique : encourager les partenariats notamment par le biais d'appels à projets ou FUI (Fonds unique interministériel), de plateformes, prévoir des structures adaptées pour avoir des capacités de production suffisantes.
- Soutenir la mise en place de formations adaptées pour former des techniciens et des ingénieurs (« cultivateurs de cellules » par exemple) : création d'une école française d'ingénierie cellulaire et tissulaire, d'une usine témoin.
- Allonger la durée des dispositifs de soutien financiers aux contraintes de ce domaine.
- Renforcer les accès aux fonds propres des entreprises (entrée de l'État dans le capital, adapter les dispositifs tels qu'InnoBio aux entreprises agroalimentaires et à l'introduction en bourse des entreprises).

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



## 77. Ingénierie génomique

### Définitions

L'ingénierie génomique repose sur des disciplines fondamentales abordant les problèmes de base de l'organisation, de la stabilité et de la variation du matériel génétique, de la réplication et de la réparation de l'ADN, ainsi que de la régulation de l'expression et de l'évolution des génomes et enfin la génomique des populations. L'étude de la régulation de l'expression des gènes et des contrôles épigénétiques, omniprésents dans le monde du vivant, représente un enjeu important pour comprendre les fonctions moléculaires de la physiologie cellulaire, la relation génotype-phénotype et les liens entre gènes, environnement et santé.

L'ingénierie génomique trouve de multiples applications, fait appel à des technologies de vectorisation et requiert la présence d'outils puissants d'acquisition et de traitement des données. Elle doit également pouvoir bénéficier du développement de nouvelles techniques d'imagerie.

### Description

Le génome peut être manipulé afin de faire pénétrer un ou plusieurs gènes d'intérêt dans les cellules ou les tissus d'un organisme vivant. Le gène peut être introduit selon deux méthodes : *in vivo* et *ex vivo*. Dans la méthode *in vivo*, le gène est directement introduit. Dans la méthode *ex vivo*, les cellules ciblées sont d'abord prélevées puis modifiées génétiquement par l'introduction du gène avant d'être ré-administrées au sein de l'organisme.

De nouvelles recherches sont aujourd'hui développées et reposent, en plus de l'ADN, sur des petits ARN interférents (ARNi). Cette technique de ciblage cellulaire des ARNi permet le blocage des ARN messagers (ARNm) par les ARNi et ainsi la correction du dysfonctionnement d'une protéine.

La transgénèse correspond à la modification du génome d'un organisme par génie génétique. Elle peut être réalisée au niveau de micro-organismes, de cellules de plantes ou d'animaux et résulte en un organisme génétiquement modifié.

Le transfert de gènes et la vectorisation sont clés dans la maîtrise de l'ingénierie génomique. Les gènes sont introduits au moyen de vecteurs viraux – vecteurs rétroviraux, adénoviraux ou issus de virus associés aux adénovirus (AAV) par exemple – ou non viraux – plasmides ou vecteurs lipidiques par exemple.

Des verrous technologiques subsistent. Ainsi, malgré les récentes avancées scientifiques, l'insertion du gène n'est pas encore complètement maîtrisée ; pour cela, une meilleure connaissance des voies d'insertion des vecteurs et de la localisation dans le génome du gène introduit est indispensable. Le transfert de gènes doit également être assuré de manière sûre et efficace et garantir la stabilité de l'expression du gène introduit. Par ailleurs, la transgénèse était réalisée jusqu'à présent de manière aléatoire ; l'enjeu est de cibler des modifications très précises. Les nouvelles générations de séquenceurs constituent des outils précieux pour cela.

### Applications

L'ingénierie génomique trouve de nombreuses applications en agronomie et agroalimentaire. L'enjeu est de répondre aux besoins en termes d'agriculture durable, en développant des variétés requérant moins d'eau et de pesticides, et davantage résistants aux conditions de culture. Il s'agit d'organismes génétiquement modifiés (OGM). La superficie mondiale des cultures génétiquement modifiées est de 134 millions d'hectares en 2009 et devrait croître à 200 millions d'hectares d'ici à 2015 (sur 40 pays) [38].

Sans aller jusqu'aux OGM, l'ingénierie génomique permet également de sélectionner des variétés animales ou végétales présentant des caractéristiques agronomiques d'intérêt. Elle permet également de combiner dans une même souche de bactéries ou de levures les gènes permettant de produire les enzymes capables de transformer la cellulose en éthanol, pour la production de bio-carburants à partir des restes des cultures.

En santé, les pathologies concernées par l'ingénierie génomique sont nombreuses. Les avancées en ingénierie génomique permettent notamment le développement de la thérapie génique. En juin 2010, 1 644 essais cliniques sont en cours dans le monde. La grande majorité de ces essais est en phase I (60,5 %) ; seuls 3,5 % sont en phase III [36]. Le marché mondial de la thérapie génique est estimé à 484 M\$ en 2015 [37]. En avril 2010, aucun produit de thérapie génique n'a encore été approuvé par la Food and Drug Administration (FDA).

En modifiant le génome de certaines espèces animales, il est également possible de produire des biothérapies (par exemple à partir de lapins génétiquement modifiés). Enfin, l'ingénierie génomique est porteuse de services à très haute valeur ajoutée, notamment au travers du séquençage du génome basé sur les nouvelles générations de séquenceurs, mais aussi de services de caractérisation de l'impact et de contrôle qualité de la chirurgie génomique (à l'image des sociétés de service de type immunomonitoring).

### Enjeux et impacts

Les enjeux sont tout d'abord médicaux. Le spectre des maladies concernées par la thérapie génique est très large et la thérapie génique favorise le développement de nouveaux traitements médicaux et en particulier de solutions pour certaines maladies incurables à l'heure actuelle (telles que des maladies orphelines). En revanche, si les essais sur les animaux sont porteurs d'espoir, le passage de l'animal à l'homme demande des financements importants et une organisation adaptée.

Il faut également noter des enjeux de durabilité, soit par l'obtention de variétés adaptées aux conditions climatiques et nécessitant moins d'intrants, soit l'obtention de produits autrement qu'à partir de pétrole.

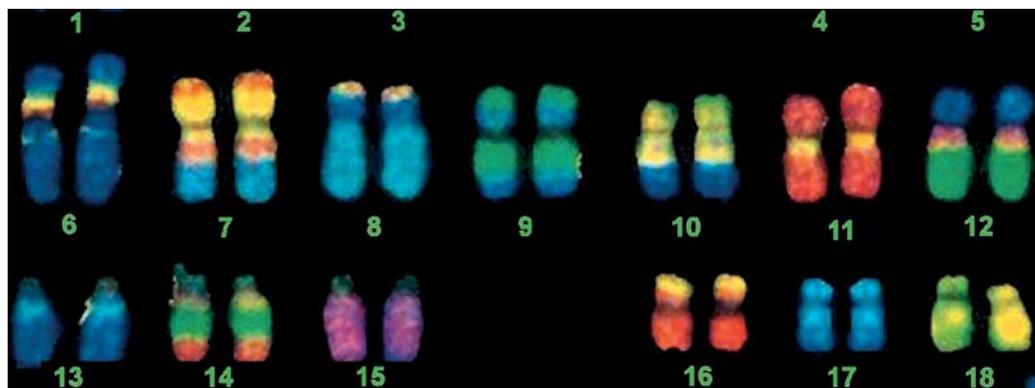
Enfin, les questions éthiques et sociales sont très importantes. Le Comité consultatif national d'éthique (CCNE) s'est exprimé à plusieurs reprises sur la thérapie génique et préconise de limiter les recherches aux seules cellules somatiques et d'exclure les cellules germinales. La société française est également très réfractaire à l'idée de consommer des produits issus d'OGM.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation



## Liens avec d'autres technologies clés

1	2	3
20	28	41
76	84	

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : Généthon, Inserm (LTG, UCG Nantes), Institut Pasteur Université Paris Descartes (Département de biothérapie), Transgene
- **Industriels** : Cayla, Collectis, Clean Cells, Genopoiétic, Genosafe, In-Cell-Art, PrimeBiotech
- **Utilisateurs** : Hôpital Necker, Sanofi-Aventis, Limagrain
- **Structures relais** : AFM, Alsace BioValley, Lyonbiopôle, Medicen

### Principaux acteurs étrangers

- Avigen, Cell Genesys, Introgen Therapeutics, Genvec, Genzyme Corporation, Pioneer HiBred International, Targeted Genetics Corp, Urogen Pharmaceuticals Inc., Vical (Etats-Unis), Gene Signal (Suisse), AnGes MG (Japon), Oxford BioMedica (Royaume-Uni), Shenzhen SiBiono GeneTech Co., Ltd (China)

## Position relative de la France

La France possède une bonne position en recherche avec la présence de plusieurs centres de recherche de pointe en génétique et génomique. En 1999, la France a d'ailleurs été le premier pays à tenter de soigner des bébés privés de défenses immunitaires, dits « bébés-bulles » grâce à la thérapie génique. Des entreprises telles que Transgene ou Collectis se distinguent à un niveau international.

Au niveau des essais cliniques, les États-Unis sont le pays leader et réalisent 62,9 % des essais cliniques en thérapie génique dans le monde. La France, avec 44 essais cliniques en cours – soit 2,7 % – se situe en cinquième position, derrière le Royaume-Uni (11,9 %), l'Allemagne (4,8 %) et la Suisse (2,9 %) [36]. Concernant les applications environnementales et agroalimentaires, la France

est en retard, tant sur la production de biocarburants que sur le recours aux OGM. Ce retard est en grande partie dû aux véritables difficultés d'acceptabilité sociétale.

## Analyse AFOM

### Atouts

Compétences présentes (centres de recherche de pointe) ; des industriels de niveau international ; force de l'AFM.

### Faiblesses

Règlementation ; faibles investissements ; dimensions sociales et éthique ; peu de centres de production de vecteurs significatifs.

### Opportunités

Large spectre d'applications ; résultats positifs de certains essais cliniques.

### Menaces

Forte concurrence internationale, notamment des États-Unis ; éthique.

## Recommandations

- Poursuivre les réflexions réglementaires et éthiques.
- Soutenir la mise en place de centres de production de vecteurs de deuxième génération, tout en favorisant la mutualisation de la demande (engager pour cela un grand programme avec des industriels impliqués).
- Soutenir le développement d'infrastructures type P3, avec des salles blanches et un confinement de grade industriel, accessibles aux PME.
- Soutenir les développements en bio-informatique et la mise en place de formations permettant de posséder le potentiel humain (en bio-informatique et en bioproduction). Adéquation avec les investissements d'avenir.

### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

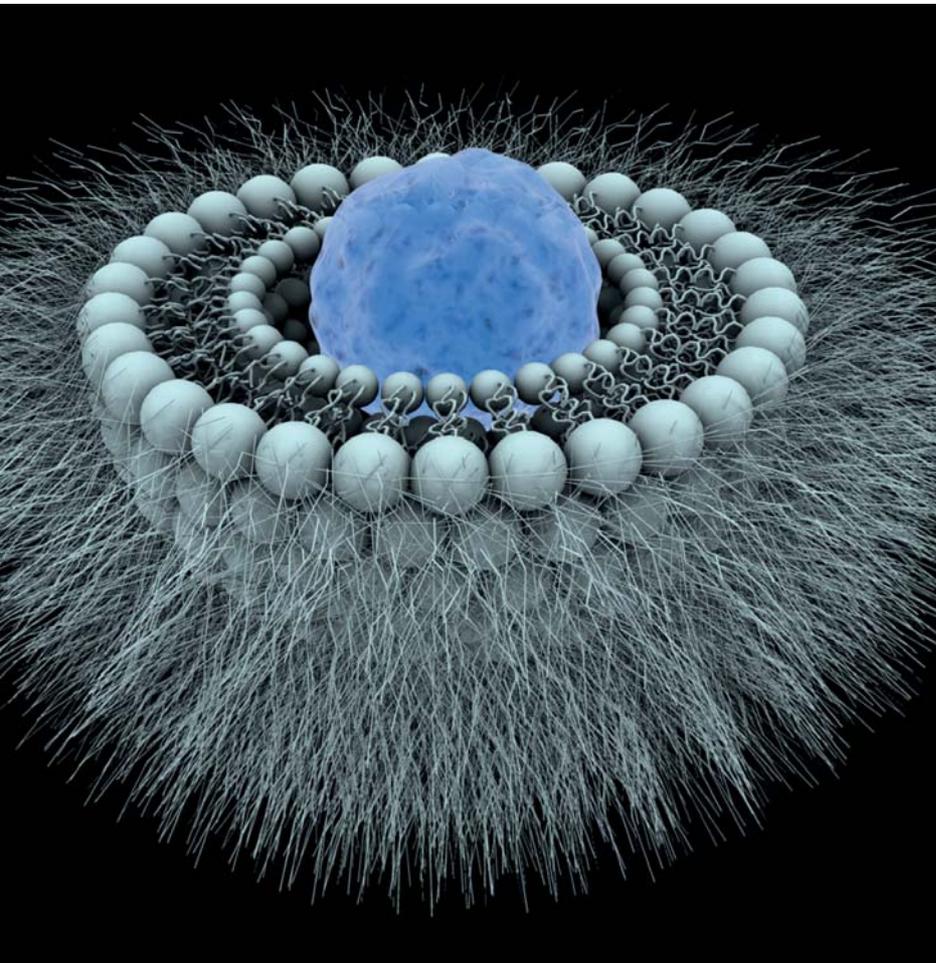
● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



# 78. Ingénierie du système immunitaire



mental dans l'orientation de la réponse immunitaire et sont reconnues pour être de très bonnes cellules présentatrices d'antigènes. Dans le cas de la recherche de traitement contre le cancer par exemple, le but est d'utiliser cette capacité en associant une cellule dendritique à un antigène d'intérêt d'une tumeur. L'antigène est ensuite présenté à un lymphocyte qui, via le TCR, va reconnaître l'antigène et détruire la tumeur.

La maîtrise de la réponse immunitaire est loin d'être totale, ce qui explique en partie que les thérapies développées aujourd'hui soient le plus souvent personnalisées à chaque cas, et donc extrêmement coûteuses (comme dans le cas des thérapies cellulaires autologues). Il est également nécessaire de mettre en place des approches systématiques, regroupant des analyses à grande échelle du génome, du transcriptome, du protéome et du métabolome et les criblages fonctionnels des cellules du système immunitaire. Le développement de modèles animaux est également nécessaire (murins et grands animaux).

## Applications

L'ingénierie du système immunitaire trouve évidemment des applications en santé humaine mais aussi animale, pour développer des stratégies thérapeutiques ou de prévention. L'immunothérapie, les vaccins thérapeutiques et la thérapie cellulaire représentent des champs d'applications majeurs de l'ingénierie du système immunitaire. Celle-ci permet également de définir des stratégies de protection en cas de menaces bioterroristes.

La compréhension du système immunitaire et la capacité à le manipuler touchent par ailleurs un large spectre de pathologies dont : les maladies auto-immunes, les cancers, les maladies infectieuses (Sida, hépatites B et C), les allergies, le diabète etc. L'immunothérapie cancéreuse constitue par exemple une nouvelle approche potentielle pour le traitement du cancer. Le marché des vaccins croît de 15 à 25 % par an et est estimé à 20 Md€ en 2015 alors qu'il est de 10 Md€ en 2010 [39]. Le marché français de l'industrie de santé animale représente le premier marché européen avec 835 M€ de chiffres d'affaires en France et 1,4 Md€ à l'exportation [6].

Il s'agit d'un champ de recherche porteur, y compris sur le plan de la biologie fondamentale. L'ingénierie du système immunitaire contribue également à l'amélioration des connaissances sur les allergies, à la découverte de biomarqueurs et au développement de produits d'alimentation santé.

Au global, ce domaine est porteur d'activités de service, communes au développement de tout principe / molécule active et spécifiques au domaine des protéines et anticorps.

## Description

Le système immunitaire est un système de défense naturel de l'organisme composé d'un réseau complexe de cellules, d'organes et molécules. Il existe deux systèmes immunitaires qui coopèrent l'un avec l'autre : l'immunité « innée » et l'immunité « acquise ».

L'ingénierie du système immunitaire a pour but de comprendre le système immunitaire dans le but de mieux le manipuler. L'objectif principal est de modifier et d'optimiser tous les composants du système immunitaire tels que cellules ou molécules. Il peut par exemple s'agir de trouver de nouveaux anticorps ou de modifier les anticorps existants afin de les rendre plus spécifiques. En vaccinologie, l'immunologie moléculaire et cellulaire permet de concevoir des vaccins sur des bases plus rationnelles et moléculaires.

De nouvelles méthodes d'ingénierie d'éléments du système immunitaire sont aujourd'hui développées, basées notamment sur les cellules dendritiques et les TCR (*T Cell Receptor*). Les cellules dendritiques jouent un rôle fonda-

### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Enjeux et impacts

L'ingénierie du système immunitaire est essentielle dans le développement de nouveaux traitements pour certaines pathologies. Elle joue également un rôle majeur en santé publique, notamment dans la prévention du risque sanitaire lors d'épidémies ou de pandémies. 75 % des maladies émergentes chez l'homme étant d'origine animale (selon l'Organisation mondiale de la santé animale), les médicaments vétérinaires visant à prévenir les maladies infectieuses ou parasitaires contribuent à la sécurité sanitaire. Ils contribuent également à la compétitivité de l'élevage (la fièvre aphteuse a coûté au Royaume-Uni 12 Md€), et à la sécurisation de la filière agroalimentaire. Par ailleurs, les aspects réglementaires et éthiques ne sont pas à négliger puisque l'ingénierie du système immunitaire implique en partie l'utilisation de cellules souches. Enfin, les temps de développement de nouvelles thérapies sont très longs – ils peuvent atteindre 10 à 15 ans pour de nouveaux vaccins par exemple – ce qui peut dissuader les potentiels investisseurs d'injecter les capitaux nécessaires au développement de tels produits.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CNRS (GICC), Inra, Inserm (U768, U783), Institut Curie, Institut Pasteur Université Pierre et Marie Curie
- **Industriels** : Biocytex, Biomérieux, Ceva, Erytech, Génopoint, IDM, Imaxio, Innate Pharma, Merial, Monoclonal Antibodies Therapeutics, Neovacs, P.A.R.I.S., Pierre Fabre, Proteogenix, Sanofi-Aventis, Stallergenes, Transgene, Virbac, Vitoquinol, Vivalis
- **Structures relais** : Alsace BioValley, Lyonbiopôle, Medicen, Réseau Français pour la Santé Animale (RFSA), représentants des filières animales

### Principaux acteurs étrangers

- Abbott, Acambis, Amgen, Bavarian Nordic, Baxter, Genzyme, GlaxoSmithKline, Johnson & Johnson, Medigene, Merck, Novartis, Novavax, Pfizer, Roche, Solvay, Wyeth, Xenova

## Position relative de la France

La France est en bonne position dans le domaine de l'ingénierie du système immunitaire. Elle possède de réelles forces académiques, notamment avec la présence de l'Institut Pasteur dont les départements, en grande partie, s'intéressent au système immunitaire.

Par ailleurs, la France est très bien positionnée dans le domaine de la vaccinologie. L'écosystème français est particulièrement riche, regroupant des forces croissantes à la fois académiques et industrielles. Ainsi, 253 publications françaises relatives au domaine ont été publiées en 2008 [40] et les industriels français Sanofi-Aventis, Biomérieux et Merial font partie des leaders mondiaux. La France se distingue également par la présence de PME innovantes telles que Neovacs.

La France est le leader du marché des vaccins pour l'homme en Europe, et des raisons historiques et économiques ont fait de la France le deuxième marché de santé animale au monde. Au-delà des vaccins, la France est le premier pays en matière de recherche et de fabrication de médicaments et de réactifs pour les animaux en Europe.

## Analyse AFOM

### Atouts

Compétences académiques ; des leaders industriels ; des plateformes technologiques.

### Faiblesses

Manque de coordination dans la communauté scientifique.

### Opportunités

De nombreuses pathologies sans traitement actuellement ; des problématiques de santé publique au cœur des préoccupations (pandémie, etc.).

### Menaces

Éthique, acceptabilité ; gestion des crises et impact sur la confiance des consommateurs.

## Recommandations

- Faciliter l'interdisciplinarité et la mutualisation des connaissances, par exemple en soutenant la création d'un institut spécialisé en immunologie, à l'instar de l'Institut du cerveau et de la moëlle épinière.
- Encourager la démarche de médecine translationnelle.
- Instaurer ou renforcer des registres nationaux labellisés permettant de recueillir les données essentielles associées aux pathologies concernées.
- Soutenir les recherches économiques et sociales sur les problématiques de santé publique et de gestion des crises.

## Liens avec d'autres technologies clés

2

76

77

### Maturité (échelle TRL)

	Émergence (TRL : 1-4)
	Développement (TRL : 5-7)
	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

	Leader ou Co-Leader
	Dans le peloton
	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

	Faible
	Moyen
	Fort



# 79. Technologies pour la biologie de synthèse

## Définitions

La biologie de synthèse est un domaine de recherche très récent et en plein essor, destiné à révolutionner la biologie. Elle peut être définie comme étant l'ingénierie de la biologie et a pour objectif « la conception rationnelle et la construction de systèmes complexes basés sur ou inspirés par le vivant mais dotés de fonctions absentes dans la nature » [41].

Cette perspective d'ingénierie peut s'appliquer à toutes les échelles des structures biologiques – des molécules individuelles aux cellules, tissus et organismes.

Le champ d'application est très vaste : santé, chimie, environnement, énergie, agriculture, biomatériaux ou biosécurité.

Trois démarches relèvent de la biologie de synthèse :

- construction de systèmes artificiels ayant un comportement spécifié par l'assemblage de briques d'origine naturelle ;
- reconstitution du vivant avec des composants artificiels, pour mieux comprendre la vie et la dynamique évolutive ;
- synthèse de génomes minimaux, pour mieux appréhender les cellules et produire des cellules hautes.

## Description

La biologie de synthèse associe le séquençage de l'ADN, la synthèse de cet ADN et la modélisation informatique. Elle peut être organisée selon deux approches différentes : *top-down* ou *bottom-up*. L'approche *top-down* consiste à manipuler le génome d'un être vivant existant afin de le réduire au minimum dans le but de le rendre plus simple et donc plus compréhensible et manipulable. L'approche *bottom-up* consiste à définir et assembler des biobriques (segments d'ADN fonctionnels définis) afin de fabriquer un nouveau génome d'un nouveau type d'être vivant répondant à des spécifications fonctionnelles précises. Sur le plan technologique, les entreprises et laboratoires se focalisent en particulier sur les éléments suivants : la longueur des brins d'ADN qu'ils sont capables de synthétiser, la longueur totale d'assemblage et l'absence d'erreurs dans la séquence produite. Les avancées réalisées sont également très dépendantes des travaux sur la modélisation *in silico* et le calcul intensif.

## Applications

En première échéance, la biologie de synthèse donnera de nouvelles clés pour la bioproduction. À plus long terme (au-delà de 10 ans), elle modifiera de nombreux processus de R&D pour tous les champs d'application de la biologie (médicaments personnalisés, détection précoce de certaines pathologies, intervention médicale au niveau moléculaire plutôt que chirurgical).

La biologie de synthèse est également très prometteuse pour l'amélioration des procédés de transformation des biocarburants, et pour les biotechnologies blanches (davantage détaillées dans le secteur Chimie-Matériaux-Procédés). Le marché de la biologie de synthèse est en pleine expansion. Évalué entre 30 et 40 M\$ en 2006, le marché de la synthèse pure est estimé à 700 M\$ en 2010 puis à 3 Mds\$ en 2015, avec une croissance annuelle comprise entre 30 et 50 % [42]. Des premiers succès ont déjà été accomplis : technologie VERSANT™ de BayerDiagnostics commercialisée, artémisinine d'hémi-synthèse autorisée par la FDA.

nouvelles espèces biologiques pour identifier des étapes industrielles.

Sur le plan financier, les coûts d'investissement sont très élevés et constituent une forte barrière à l'entrée. De plus, plusieurs débats sont en cours, en particulier sur la création artificielle du vivant, et la confiance des citoyens n'est pas acquise. La biologie de synthèse soulève également des problématiques de propriété intellectuelle et de brevetabilité. Enfin, notons que la biologie de synthèse peut permettre la conception d'armes biologiques et peut ainsi être utilisée à des fins de bioterrorisme.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA (Larsim), CNRS (Bioc, iGEM, iSSB, LTM), Inra, Inserm (U571), UPMC, Institut de biologie intégrative, Institut de science et d'ingénierie supramoléculaires, Institut Cochin de génétique moléculaire, Institut Curie, Institut Gustave Roussy, Laboratoire « Programme d'épigénomique »
- **Structures relais** : Atlanpole Biotherapies, Genopole, Medicen
- **Gene Foundries** : Genosphere
- **Industriels** : AMAbiotics SAS, BioMéthodes, Collectis, Dendrics, Global Bioenergies, Heurisko SAS, Isthmus SARL, METabolic Explorer, Protéus

### Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : BioFab Group rassemble des scientifiques des plus grandes universités américaines (MIT, Berkeley, Harvard, Princeton), Venter Institute (Etats-Unis)
- **Gene Foundries** : Blue Heron Biotechnology, Codon Devices, DNA2.0 (Etats-Unis), GeneArt (Allemagne)
- **BioSynTech** : Amyris, Gevo, LS9, Mascoma, ProtoLife, Synthetics Genomics (Etats-Unis)
- **Industriels** : Amyris Biotechnologies, Siemens Healthcare Diagnostics, DuPont

## Position relative de la France

Les États-Unis sont les pionniers dans le domaine de la biologie de synthèse. La majeure partie de la recherche est aujourd'hui américaine. Ainsi, 63 % des publications scientifiques portant sur la biologie de synthèse sont issues des institutions américaines ; l'Europe représente seulement 19 % de ces publications [43]. Les pays européens les plus contributeurs sont l'Allemagne qui fournit 35 % des publications, l'Angleterre qui fournit 20 % des publications et la France qui fournit 11 % des publications européennes sur le sujet, soit moins de 2 % des

### Degré de diffusion dans l'absolu

	Faible diffusion
	Diffusion croissante
	Généralisation

### Degré de diffusion en France

	Faible diffusion
	Diffusion croissante
	Généralisation



## Liens avec d'autres technologies clés



publications mondiales. Par ailleurs, 85 % des financements pour des projets de recherche publics dans le monde proviennent des États-Unis. Au niveau académique, la France est donc en retard par rapport au leader américain mais fait partie du trio moteur au niveau européen ; dans tous les cas il s'agit d'un domaine émergent. Au niveau des entreprises, on distingue celles capables de synthétiser à proprement parler les gènes – les *Gene Foundries* – et celles qui utilisent ces gènes afin de produire des applications à haute valeur ajoutée – les *BioSynTechs*. Là également, les États-Unis dominent le secteur. Peu de *Gene Foundries* existent en France ; on peut néanmoins citer Genosphere qui propose des services de synthèse de gènes. Les *BioSynTechs* sont quant à elles moins nombreuses que les *Gene Foundries* et sont une fois de plus quasi exclusivement américaines.

Il existe, en France, un réel réservoir de compétences et de savoir-faire, en particulier avec la présence de nombreux très bons mathématiciens et informaticiens. Certaines personnalités scientifiques françaises jouent par ailleurs un rôle majeur d'acteurs moteurs de la biologie de synthèse sur le plan privé ou académique : quatre équipes sur quinze au monde se trouvent ainsi au Genopole. Métabolic Explorer est également le numéro deux mondial.

## Analyse AFOM

### Atouts

Compétences présentes.

### Faiblesses

Faible présence en recherche à l'heure actuelle ; peu d'industriels : un seul *Gene Foundries* français (Genosphere) ; faibles investissements ; faible structuration y compris au niveau académique.

### Opportunités

Domaine naissant dans le monde ; investissements européens, notamment dans le cadre du programme-cadre de recherche et développement (PCRD) ; concours iGEM (concours de biologie de synthèse organisé par le MIT).

### Menaces

Forte concurrence des États-Unis (domination des *Gene Foundries*) ; brevetabilité et propriété intellectuelle ; éthique.

## Recommandations

- Favoriser la structuration de la recherche : définir des appels à projets spécifiques permettant de susciter l'intérêt de la communauté scientifique et ainsi encourager l'innovation, profiter des outils investissements d'avenir.
- Encourager la Commission européenne à afficher stratégiquement la biologie de synthèse pour le PCRD.
- Encourager la définition d'outils d'ingénierie systématiques normalisés et standardisés.
- Favoriser la rencontre entre académiques et industriels pour travailler d'emblée sur des applications industrielles et ainsi appliquer les pratiques de *data mining*.
- Engager des réflexions pour trouver des solutions sur les différentes dimensions sociales et éthiques.

### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 80. Systèmes bio-embarqués

### Définitions

Les systèmes bio-embarqués incluent des systèmes utilisant des technologies pouvant être intégrées dans un organisme vivant.

On distingue plusieurs types de systèmes bio-embarqués dont :

- les dispositifs implantables actifs sont conçus pour être implantés dans l'organisme et ont pour objectif de suppléer ou contrôler une fonction déficiente par électrostimulation directe des organes ou structures nerveuses en cause (tels des stimulateurs cardiaques implantables ou des implants cochléaires) ou de pouvoir suivre des individus d'espèces en permanence ;
- les organes artificiels consistent dans le remplacement d'organes déficients par des systèmes complexes (électroniques en général). Les organes bioartificiels interagissent quant à eux biologiquement avec l'organisme. Les prothèses sont des dispositifs destinés à remplacer un membre ou une articulation. On distingue les exoprothèses – portées sur le corps – et les endoprothèses – introduites à l'intérieur du corps.

### Description

Les systèmes bio-embarqués résultent d'une forte interdisciplinarité : compétences médicales, biologiques, chimiques, physiques (matériaux, mécanique et électronique), microtechniques. Les technologies utilisées sont notamment issues des secteurs de l'aéronautique et des télécommunications.

Les recherches actuelles et futures portent sur les grands axes suivants :

- pour la médecine régénératrice, combiner une partie synthétique – un polymère – avec des cellules différenciées et des cellules souches du patient (exemple de vaisseaux à partir de polymères biodégradables qui se remodelent en artères biologiques fonctionnelles lorsque combinées avec des cellules) ;
- plus largement combiner l'approche système mécanique et système biologique, en couplant avec des principes actifs ou agents thérapeutiques ;
- utiliser des technologies de membranes et de traitement de surface de plus en plus sophistiquées ;
- intégrer dans les systèmes bio-embarqués des capteurs de suivi en temps réel et des logiciels analysant les données et appliquant les décisions résultantes (par exemple pour la délivrance de principes actifs) ;
- mettre au point des systèmes résorbables ne laissant aucun corps étranger quelques mois-années après la mise en place ;
- annihiler les possibilités de rejet ;
- augmenter la durée de vie, en luttant contre les phénomènes de corrosion et de vieillissement, et en dotant les systèmes bio-embarqués d'alimentation en énergie adaptée ;
- augmenter le niveau de fiabilité des systèmes tout en les miniaturisant le plus en possible.

### Applications

Les systèmes bio-embarqués possèdent des applications dans tous les domaines de la santé, notamment en chirurgie orthopédique, dentaire et traumatologique, en cardiovasculaire, ainsi que dans le domaine du sport. Le domaine des neurosciences constitue un autre axe de recherche pour le développement de neuroprothèses innovantes. En 2007, 50 millions de personnes dans le monde sont porteuses d'un organe artificiel ou d'une prothèse [44]. Cette tendance va aller en augmentant du fait du vieillissement de la population. De plus, en 2009, près de 8 300 personnes sont en attente d'une greffe et chaque année et 17 millions de personnes dans le monde meurent d'insuffisance cardiaque terminale [45]. Ce sont autant de patients potentiels qui pourraient bénéficier de systèmes bio-embarqués. L'industrie mondiale des dis-

positifs médicaux est quant à elle estimée à 210,2 Md\$ en 2008. Le marché français représente près de 4 % de cette industrie avec 6,2 Md€ [2].

De nombreux autres domaines utilisent des systèmes bio-embarqués. Ceux-ci permettent par exemple de développer de nouveaux modèles mimétiques *in vitro* et *in vivo* en biologie fondamentale. L'agroalimentaire représente également un champ d'application majeur. Ainsi, les systèmes bio-embarqués peuvent aider à l'obtention de réactions enzymatiques plus rapides et également assurer le suivi des ressources telles que les ressources halieutiques.

Ces systèmes sont porteurs de nombreuses activités de service, tout au long de la chaîne de développement.

### Enjeux et impacts

Au regard des applications citées ci-dessus, les systèmes bio-embarqués répondent à des enjeux médicaux, de confort de vie, de production et de gestion des ressources durables.

L'enjeu majeur pour le développement des systèmes bio-embarqués réside dans le rapprochement et les synergies entre les différentes disciplines impliquées. Il est également nécessaire que les utilisateurs soient impliqués très tôt, notamment pour les applications santé, pour que les produits soient réellement pensés et conçus de manière translationnelle et s'insèrent ainsi naturellement dans les pratiques médicales.

Il existe également des difficultés à sensibiliser des pionniers pour tester les nouveaux systèmes. Il n'existe par exemple pas de nomenclature au sein des hôpitaux pour financer l'achat de tels prototypes. La réglementation est également hétérogène selon les dispositifs et peu lisible pour les industriels.

Enfin, les questions éthiques ne sont pas à négliger dans ce secteur. En effet, la société doit se prononcer sur le nombre des systèmes bio-embarqués que peut porter un organisme sans qu'il soit considéré comme un « homme bionique ».

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEED, Clinique Jouvenet, CNRS (BMBI, LBM), Hôpital Saint-Louis, Ifremer, Institut de la vision, IRPHE, IRD
- **Industriels** : Adocia, Carmat SA, Cleanatech, EADS, Ela Medical, Intelligent Medical Implants, MXM, Ortholine France, ProTip, Statice Santé / Alcis
- **Structures relais** : Alsace BioValley, CTTM, Eurobiomed

### Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : Université de Yale (États-Unis), Institut d'ingénierie biomédicale de Porto (INEB, Portugal), European Competence Biomedical Microdevices
- **Industriels** : Aesculap, Biotronik, Groupe Sorin, Syncardia

## Position relative de la France

La France est plutôt en bonne position. Elle possède en effet de fortes compétences dans les technologies aéronautiques, microélectroniques, biologiques et médicales. De plus, le premier cœur artificiel total est actuellement développé en France par Carmat, en partenariat avec le groupe EADS. Le cœur Carmat est actuellement en test sur des bovins et devrait être disponible en 2013.

La France comporte ainsi des initiatives industrielles ou académiques ponctuelles. Le réservoir d'entreprises des dispositifs médicaux est important, mais à ce jour, la France compte peu de grands industriels du domaine, contrairement à l'Allemagne où la Suisse. La France compte ainsi peu de sous-traitants, ceux-ci étant majoritairement localisés près des grands foyers industriels. Plus largement, la France manque de structuration, notamment pour servir l'interdisciplinarité nécessaire.

## Analyse AFOM

### Atouts

Compétences présentes dans les domaines requis ; premier pays à développer un cœur artificiel.

### Faiblesses

Manque de coordination dans la communauté scientifique et d'interdisciplinarité.

### Opportunités

Demande croissante compte tenu de l'évolution démographique et des exigences de durabilité.

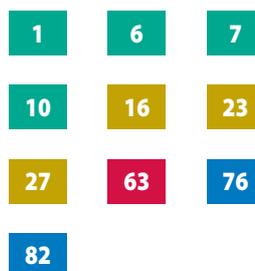
### Menaces

Concurrence internationale ; éthique ; réglementation.

## Recommandations

- Favoriser l'interdisciplinarité, notamment par la création de plateformes mutualisées innovantes, pour le développement et la démonstration.
- Favoriser le développement de centres d'excellence en médecine translationnelle dans ces domaines, pour favoriser la conception en réponse à une future valeur d'usage, pour anticiper au mieux les démarches réglementaires et accompagner les PME.
- Bonne adéquation des appels à projets dans le cadre des investissements d'avenir ou des plateformes technologiques dans ce cadre.
- Soutenir les réflexions sur la mise en place d'une nomenclature au sein des hôpitaux pour l'acquisition de prototypes innovants.

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



# 81. Technologies pour la maîtrise des écosystèmes microbiens

## Description

L'écosystème microbien désigne l'ensemble formé par une association de microbes et son environnement. Les technologies qui permettent le contrôle de ces écosystèmes microbiens passent notamment par les domaines de l'écologie microbienne et de la métagénomique microbienne ainsi que les outils qui leur sont associés.

L'écologie microbienne s'intéresse au rôle des micro-organismes dans un habitat ainsi qu'aux interactions qui existent entre eux et leur milieu. La métagénomique microbienne consiste en l'analyse collective des gènes d'une population microbienne d'un milieu donné.

L'objectif principal de ces technologies est de comprendre et de maîtriser les écosystèmes microbiens. L'épidémiologie et la microbiologie prévisionnelle peuvent ainsi permettre une meilleure compréhension des mécanismes de génération de microbes, pathogènes ou symbiontes, ainsi que leur mode de comportement afin de faciliter le pilotage de la flore microbienne. La génomique à grande échelle peut par ailleurs aboutir à la découverte d'enzymes microbiennes capables de catalyser des réactions de chimie industrielle de manière économe et non polluante (bioconversions et chimie durable).

Il existe des besoins forts en modélisation et en microbiologie prévisionnelle – méthode quantitative qui vise à évaluer le comportement d'un micro-organisme dans un aliment. Ces sciences permettent en effet d'améliorer la compréhension des écosystèmes microbiens grâce aux modèles mathématiques générés. Ceux-ci permettent de simuler le comportement microbien dans un aliment, en fonction de diverses conditions environnementales rencontrées au cours des différents stades de la vie du produit. Par ailleurs, malgré les progrès accomplis ces dernières années, les domaines de l'intégration des sciences du sol, de la microbiologie et la métagénomique microbienne ne sont pas encore totalement maîtrisés.

## Applications

Les applications des technologies pour le contrôle des écosystèmes microbiens se trouvent majoritairement en agroalimentaire. Au niveau des aliments tout d'abord, ces technologies permettent de caractériser plus finement les ferments au sein des aliments. Elles sont également essentielles pour leur conservation. En effet, leur dégradation est surtout due aux germes et savoir les maîtriser afin de conserver l'aliment sous forme comestible le plus longtemps possible est essentiel. Le secteur du prêt-à-consommer en particulier est très concerné par les technologies pour le contrôle des écosystèmes microbiens. Ce marché de la consommation hors domicile représente

en France près de 5,7 millions de repas par an et est en croissance de 10 % par an [46].

Des développements récents s'intéressent par ailleurs à l'introduction volontaire de microbes dans des aliments. Ces aliments deviendraient actifs et interagiraient avec le système immunitaire et les intestins de l'homme. La connaissance et la compréhension de l'écosystème microbien digestif humain et de ses interactions avec l'hôte et l'environnement contribue ainsi à l'amélioration de la santé humaine.

Au niveau agricole ensuite, les technologies pour le contrôle des écosystèmes microbiens sont majeures pour le développement d'engrais naturels. Ce type d'engrais enrichi en micro-organismes permet d'augmenter la biodisponibilité des nutriments du sol et ainsi de stimuler la croissance des plantes. Ce marché porteur va aller en augmentant du fait, en partie, du plan Écophyto, qui prévoit la réduction de moitié des pesticides d'ici à 2018. Aujourd'hui, avec 30 % des quantités totales utilisées, la France est le premier pays de l'UE consommateur de pesticides et le troisième mondial [46]. Il existe par ailleurs un appel à projets en France pour le développement de systèmes naturels de défense des plantes.

## Enjeux et impacts

Au niveau alimentaire, l'enjeu est d'améliorer les qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits tout en assurant une meilleure sécurité sanitaire et en rallongeant la durée de péremption des produits.

Au niveau agricole, le défi est de développer de nouvelles stratégies agricoles qui permettent de préserver la qualité des sols et l'environnement tout en maintenant une productivité élevée.

Le séquençage d'un écosystème demande néanmoins des ressources énormes, ce qui représente un frein aux investisseurs potentiels. Actuellement, la majorité des séquençages est réalisée en Chine où les délais de réponse et les coûts sont nettement plus attractifs qu'en Europe.

### Degré de diffusion dans l'absolu

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

### Degré de diffusion en France

<input checked="" type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : ANR (CES, InGEcoH), Cemagref, Cirad, CNRS (LIEBE, MDCEM), École supérieure de microbiologie et sécurité alimentaire de Brest (Esmisab), Enseignement supérieur agricole, Enva, Genoscope, Ifremer, Ina P-G, Inra (EMDS, Laboratoire de recherches fromagères), Institut Pasteur de Lille, Laboratoire d'écologie microbienne de Lyon (EcoMic), Montpellier SupAgro, Unir, Université de Toulouse
- **Industriels** : Agronutrition, Bel, Bonduelle, Bongrain, Danone, Fromageries Bel, Goemar, Pernod Ricard, Veolia Environnement, Villmorin
- Structures relais : Actilait, Adria Développement, Aérial, AgriMip Innovation, Aquimer, Céréales Vallée, IAR, Ifip Institut du porc, Mer Paca, Valorial, Vitagora

### Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : Agricultural Research Service, Conziglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Ente Nazionale Energie Alternative (ENEA), Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), Rothamsted Research, Servicios de Investigaciones Agrarias (SIA)
- **Industriels** : General Mills, HIPP, Kellogg's, McCain, Nestlé

## Position relative de la France

La France est un pays en pointe dans le domaine des technologies pour le contrôle des écosystèmes microbiens, en Europe et dans le monde. La France se distingue par les projets qu'elle mène, dont le projet Sym'Previus, impliquant des laboratoires, des entreprises membres de l'Unir (Ultrapropre nutrition industrie recherche), des centres techniques Actia (Association de coordination technique pour l'industrie alimentaire) et les pouvoirs publics, qui vise à développer un système regroupant un ensemble d'outils d'aide à l'expertise en sécurité des aliments. Destiné à des professionnels de l'alimentation – des responsables qualité ou des responsables recherche et développement – Sym'Previus utilise des modèles de microbiologie prévisionnelle et a pour but de réduire les durées de mise en œuvre ainsi que le nombre d'épreuves expérimentales.

L'Unir propose par ailleurs un programme « usine sobre » avec un volet « usine sèche ». L'objectif de l'usine sèche est de permettre de limiter voire d'éviter les proliférations de micro-organismes indésirables ayant un impact négatif sur la sécurité sanitaire des aliments. Dans ce cadre, la maîtrise de l'écosystème microbien est assu-

rée par le contrôle de l'humidité. Enfin, la génomique et les biotechnologies végétales font l'objet d'un appel à projets spécifique de l'ANR avec un axe dédié à la génomique microbienne.

## Analyse AFOM

### Atouts

Compétences présentes en microbiologie prévisionnelle, surtout en recherche ; plusieurs projets en cours dont Sym'Previus.

### Faiblesses

Peu de compétences transférées à ce jour au niveau des industriels.

### Opportunités

Prise de conscience environnementale ; bonne perception du consommateur ; nombreux produits agroalimentaires utilisant des ferments.

### Menaces

Concurrence, notamment anglosaxonne, venant du Royaume-Uni et des États-Unis.

## Recommandations

- Faire reconnaître l'outil Sym'Previus comme outil d'excellence en Europe, et l'adapter pour en faire un outil d'auto-apprentissage.
- Accompagner les laboratoires dans leurs recherches et ensuite sensibiliser les industriels.
- S'appuyer sur les centres techniques Actia, les pôles de compétitivité et les Critt pour diffuser les technologies auprès des PME.
- Renforcer l'accessibilité aux dispositifs d'innovation pour les entreprises agroalimentaires.

### Liens avec d'autres technologies clés

3

5

77

85

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



## 82. Capteurs pour le suivi en temps réel

### Définitions

Un capteur est un système intégré comprenant le moyen de réaliser une mesure. Les capteurs mentionnés ici permettent un suivi en temps réel, c'est-à-dire continu et immédiat. L'enjeu principal est de rechercher de manière rapide et précise une information sur le comportement ou l'environnement physiologique ou biologique d'un procédé ou d'un produit. Une grande majorité des technologies aujourd'hui utilisées provient des secteurs de l'armement et de l'aéronautique mais les capteurs trouvent des applications multiples en sciences de la vie. Dans ces domaines, les capteurs peuvent prendre des mesures telles que la température, la pression, l'humidité, le débit, le poids, la pression artérielle, l'actimétrie, la glycémie, etc. Développer des capteurs demande ainsi de nombreuses compétences, notamment en : informatique, optique, mécanique, télécommunications, acoustique, matériaux, électronique et micro-électronique.

### Description

On distingue plusieurs typologies de capteurs :

- les biocapteurs, incorporant un matériau biologique comme des enzymes ou des anticorps, des cellules ou de l'ADN ;
- les capteurs basés sur un signal électrique (capteurs chimiques potentiométriques, capteurs à polymère conducteur, etc.) ;
- les capteurs basés sur une interaction avec des ondes électromagnétiques ;
- les capteurs basés sur une interaction avec des ondes ultrasonores ;
- les capteurs basés sur des variations de fréquence, ou impliquant des agents sélectifs ;
- les capteurs basés sur des technologies MEMS / MOEMS et NEMS / NOEMS (systèmes respectivement micro et nano-électromécaniques).

Les développements actuels visent à proposer des mesures en continu avec un spectre plus large et une sélectivité plus fine. Ils portent également sur des capteurs (bio) implantables, technologiquement complexes du fait des problématiques de rejet, d'énergie et d'alimentation. Il existe par ailleurs un réel besoin de développer des technologies associant MEMS et NEMS pour servir les futurs besoins de capteurs à très bas coûts des applications grand public et, à plus long terme, des technologies NEMS pour des capteurs d'analyse biochimiques. Le capteur doit être conçu pour une future intégration dans un système global, par lequel l'information traitée est émise sur un réseau de communication sous forme numérique. Des recherches sont ainsi menées sur le développement de systèmes de mesures robustes et fiables, intégrant diverses échelles de temps adaptées aux besoins et pouvant communiquer entre eux, avec des interfaces de lecture simples. D'importantes infrastructures de réseaux (réseaux sans fil, etc.) sont également nécessaires.

### Applications

En santé, les capteurs pour le suivi en temps réel trouvent des applications majeures en télésurveillance, c'est-à-dire dans le suivi à distance des paramètres médicaux d'un patient. La télésurveillance s'adresse également à l'assistance aux personnes, notamment aux personnes âgées, pour prévenir le risque de chute ou de fugue par exemple. Le marché de la télémédecine, encore naissant et très fragmenté, est estimé à 1,2 Md€ en Europe et à 90 M€ en France [16]. En défense, les capteurs permettent le télé-suivi du blessé lors de son évacuation et le suivi du personnel opérant sous fortes contraintes (stress, fatigue, etc.).

Les capteurs pour le suivi en temps réel répondent également au besoin de suivi des bioprocédés industriels, aussi bien en agroalimentaire qu'en biotechnologie. Par exemple, la présence d'une bactérie dans un liquide tel que le lait ou la bière peut être rapidement détectée et ainsi permettre les décisions *ad hoc*. Les capteurs peuvent également être utilisés au contact direct des aliments via les emballages. Le marché mondial de ces nouveaux emballages émergents incorporant des capteurs (appelés actifs et intelligents) devrait augmenter de 13 % par an pour atteindre 1,1 Md\$ en 2011, dont 39 % sont consacrés à l'alimentaire [47].

La télédétection en agriculture représente un autre vaste champ d'application. Les capteurs permettent alors de réaliser des mesures utilisées pour l'observation, l'analyse et l'interprétation des surfaces agricoles – plantes, sol, mauvaises herbes, maladies ou climat. Ces informations transformées et analysées peuvent être directement utilisées pour la conduite de cultures.

### Enjeux et impacts

En santé, les enjeux économiques et de santé publique sont considérables. Les capteurs biologiques et physiques permettent d'aller vers une prise en charge plus personnalisée et à domicile, et ainsi de contribuer à la réduction significative des dépenses de santé nationales. Certains services de télémédecine et de télésanté dépendront de l'adoption effective de capteurs pour les personnes à domicile.

En agroalimentaire, les capteurs permettent d'améliorer la sécurité sanitaire des aliments tout en assurant une meilleure traçabilité et un meilleur suivi des produits. Plus largement, ils contribuent également à diminuer le coût de revient particulièrement élevé pour les entreprises positionnées sur les bioprocédés industriels (en diminuant les pertes ou en permettant de les traiter plus rapidement).

Les industriels font face à plusieurs enjeux : temps de développement et coûts associés qui peuvent être élevés et difficultés de test et de validation notamment en termes d'accès à des tests cliniques en santé. Par ailleurs, le cadre juridique et législatif peut constituer un frein important. En santé par exemple, malgré la reconnaissance de la télémédecine dans la loi de 2004 et la loi « hôpital, patients, santé et territoires » de 2009, plusieurs textes réglementaires ne sont plus adaptés. Enfin, les capteurs destinés aux personnes peuvent rencontrer des difficultés d'acceptabilité, d'une part, en termes de prix à l'achat et, d'autre part, en termes de respect de la vie privée et de contraintes associées.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input type="radio"/>	Diffusion croissante
<input checked="" type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D publique** : CEA (LIST), Enssat (groupe Capt Conception et développement de systèmes de capteurs biologiques et physiologiques), ERT 1052 CBAC, ESIEE Engineering, Inra, Inria, Irisa (Cairn - Traitement du signal), Institut technique des sciences et techniques de l'aliment de Bordeaux, Laboratoire CBAC, Satie Insa de Lyon, UBS (LIMATB - mécanique), UMR Cemagref - Enesad, UMR CNRS 6144 Gepea
- **Industriels** : Absciss, Alpha Mos, Audin, Auxitrol, Calydial, Cryolog, Cyberstar, Diatelic, Mediag, Merial, Orange Healthcare, ORFIDée, Pléiades Technologies, Sanofi Pasteur, SRETT, ST Microelectronics, Tronics
- **Structures relais** : AgriMip Innovation, AgroHall d'Evreux, Aquimer, Cap Digital, Centre de ressources technologiques agroalimentaires (Agir) de Talence, IAR, Lyonbiopôle, Medicen, réseau Actia, System@tic, Valorial, Vitagora

### Principaux acteurs étrangers

- CardioMEMS, Cisco, Debiotech, GE Healthcare, Groupe Sorin, Intel, Medtronic, Microsoft, Philips Healthcare, Sensimed, Siemens

## Position de la France

La recherche sur les capteurs en santé, et notamment en télémédecine, est particulièrement poussée aux États-Unis. Dans le secteur agroalimentaire, les normes de qualité sont plus drastiques en Europe qu'ailleurs. Elles nécessitent ainsi des mesures de grandeur plus fines et complexes, et rendent les industries plus frileuses aux changements dans leurs procédés de production ou d'emballage.

Au sein de l'Europe, la France possède des acteurs phares tels que ST Microelectronics et des compétences académiques fortes. En revanche, le tissu d'industriels est peu structuré, peu compétitif en termes de coûts de production et manque en particulier d'équipementiers. Si la France a longtemps souffert d'un manque d'ambition et de soutien affiché à l'intégration d'outils tels que les capteurs pour le suivi en temps réel, les initiatives et le soutien se développent. Par exemple, ProPack Food, un réseau mixte technologique, a été mis en place afin de permettre aux industries de l'agroalimentaire et de l'emballage de bénéficier des avancées et travaux de la recherche sur la thématique « procédé-emballage-aliment ».

## Analyse AFOM

### Atouts

Quelques acteurs industriels phares (ST Microelectronics) et des compétences académiques fortes.

### Faiblesses

Manque d'équipementiers ; faiblesse des investissements des utilisateurs ; manque de coordination entre les différentes disciplines requises.

### Opportunités

Enjeux forts associés à l'autonomie des personnes et à la sécurité alimentaire.

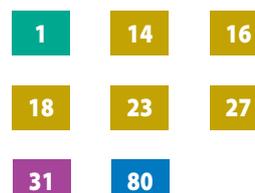
### Menaces

Cadre juridique et législatif contraignant la mise en place des capteurs en temps réel ; concurrence forte venant des États-Unis et du Japon.

## Recommandations

- Soutenir les actions collectives, telles que la plateforme Food For Life, qui travaillent activement sur ces sujets.
- Mener des actions de sensibilisation, auprès des entreprises agroalimentaires pour la mise en place de tels capteurs, et auprès de la population pour les applications santé.
- Soutenir le développement de plateformes de démonstration et l'accès à des outils de validation (possible adéquatation des appels à projets investissement d'avenir).
- Poursuivre les appels à projets TIC et santé, ainsi que les réflexions sur le cadre juridique et législatif de la télémédecine en général et de la télésurveillance en particulier.

## Liens avec d'autres technologies clés



### Maturité (échelle TRL)

● Émergence (TRL : 1-4)
● Développement (TRL : 5-7)
● Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

### Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



## 83. Technologies de diagnostic rapide

### Définitions

Les technologies de diagnostic rapide permettent une rapidité de diagnostic de résultat sur le terrain et peuvent être appliquées dans différents secteurs : santé, agroalimentaire ou environnement. Le diagnostic rapide est accompli par l'utilisation d'instruments automatisés et transportables à la main.

Le développement de ces technologies requiert le recours à des disciplines aussi variées que la génomique, la biologie moléculaire, la bioinformatique, les nanotechnologies, la microfluidique, les capteurs et micropuces ou la fonctionnalisation de matériaux. Il fait également souvent appel aux technologies de miniaturisation et de micro-détection.

Aucune technologie n'est prioritaire, les tests étant réalisés au cas par cas. Si ces systèmes peuvent être focalisés sur un seul paramètre, la tendance est au développement du multiplexage – mesure simultanée de plusieurs paramètres complémentaires. D'autres développements portent sur des systèmes rendant les résultats immédiatement disponibles au sein de fichiers médicaux électroniques.

### Description

On distingue plusieurs types de systèmes pour le diagnostic rapide :

- des tests ayant pour support des bandelettes basées sur des membranes, nécessitant une seule goutte d'échantillon ;
- des tests moléculaires ;
- des tests basés sur des technologies « compact disc » ;
- des dispositifs microfluidiques, décrits comme des laboratoires sur puce, permettant d'intégrer, sur une surface de quelques centimètres carrés, l'ensemble des volumineux appareils d'analyse biologique, depuis la préparation des échantillons (séparation cellulaire, extraction de l'ADN, marquage, etc.) jusqu'aux résultats ;
- la PCR temps réel (réaction de polymérisation en chaîne) qui permet en temps réel d'amplifier *in vitro* une séquence génomique spécifique de la présence de la cible recherchée et de détecter simultanément « en temps réel » l'apparition des séquences amplifiées.

### Applications

Le diagnostic rapide suscite beaucoup d'intérêt dans le domaine de la santé. De nombreuses pathologies et situations cliniques font l'objet de développement (infections, maladies cardiovasculaires, situations d'urgence et en soins intensifs, etc.). Par ailleurs, pour la défense et la sécurité civile, le diagnostic rapide permet de prendre en charge rapidement un blessé ou une personne malade lors de son évacuation.

Le marché du diagnostic rapide devrait connaître une forte croissance, de 10,5 Md€ en 2008 à 17,7 Md€ en 2013. Il représente 25 % du marché du diagnostic *in vitro* [48]. Toutefois, les technologies de diagnostic rapide ne se restreignent pas au domaine de la santé. Ces technologies sont également applicables au diagnostic d'agents pathogènes sur les chaînes de production, notamment en agroalimentaire, et au diagnostic environnemental. Quel que soit leur champ d'application, les tests de diagnostic rapide contribueront à la diffusion des biomarqueurs, certains ne pouvant être utilisés dans la pratique que sous couvert d'une utilisation possible rapide et sur site. Le manque d'accessibilité à des technologies permettant de recueillir de façon reproductible et sans dégradation les échantillons « sample prep » explique l'échec de certaines stratégies de recherche-validation clinique des biomarqueurs. En 2007, le marché mondial des biomarqueurs était estimé à 5,6 Md\$, avec une croissance annuelle prévue entre 5 et 18 % [49].

Des activités de service sont développées autour de ces technologies, pour le développement des dispositifs, pour l'apport d'expertise dans les domaines d'application, ou pour la validation des outils développés.

### Enjeux et impacts

Les technologies pour le diagnostic rapide répondent aux enjeux de :

- réduction de la morbidité et mortalité, en réduisant le temps de réalisation du diagnostic et de prise de décision ;
- réduction des coûts : réduction des temps de prise en charge post-opératoires ou en unité d'urgence ; réduction du nombre de visites des patients à l'hôpital ; plus grande réactivité sur les chaînes de production (production stérile) ;
- sécurité alimentaire et environnementale.

Les systèmes de diagnostic rapide font eux-mêmes face à de nombreux enjeux, auxquels les développements techniques doivent répondre :

- possibilité d'utilisation dans des cadres de prise en charge non traditionnels et éloignés des laboratoires d'analyses médicales ;
- rapidité et coûts de la collecte et préparation de l'échantillon ;
- performance en termes de spécificité, sensibilité, pour différents types d'échantillons ;
- facilité d'interprétation des résultats délivrés ;
- possibilité d'intégrer plusieurs méthodes de mesure en parallèle (acides nucléiques, protéines, etc.) dans le même système, notamment pour permettre le multiplexage ;
- dans le cas des maladies infectieuses, capacité à prendre en compte les mécanismes de résistance ou de virulence accrue ;
- production de masse à bas coût.

D'autres verrous doivent également être levés. Il est ainsi nécessaire de développer des méthodes d'analyse et de contrôle qualité pour la caractérisation, la purification, la stabilité des composants. Des approches doivent également être définies pour déterminer la sécurité et l'efficacité, notamment des nouvelles approches moléculaires appliquées au cadre du diagnostic rapide.

Par ailleurs, il faut encore assurer une prise en charge appropriée, définir les modes et niveaux de remboursement des tests et revoir l'organisation des soins, ce qui peut prendre du temps au regard du conservatisme de certains acteurs tels que les biologistes au sein des laboratoires.

#### Degré de diffusion dans l'absolu

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

<input type="radio"/>	Faible diffusion
<input checked="" type="radio"/>	Diffusion croissante
<input type="radio"/>	Généralisation

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA Leti, ISPBL, Laboratoire de microbiologie, LEOM (Laboratoire d'électronique optoélectronique et microsystèmes), SROMB (Laboratoire de synthèse, reconnaissance, organisation moléculaire et biomoléculaire), ST Microelectronics, Université Claude Bernard Lyon 1
- **Industriels** : Antagène, Biomérieux, Elitech, Exonhit Therapeutics, Genesystems, Ingen, Ipsogen, Quotient Diagnostics, Sigma Aldrich France
- **Structures relais** : Alsace BioValley, Cancer-Bio-Santé, Eurobiomed, Lyonbiopôle, Medicen

### Principaux acteurs étrangers

- Abbott Point of Care, Becton Dickinson, BioRad, Chembio, Ortho Clinical Diagnostics, Path, Roche Diagnostics, Siemens, Tessarae LLC

## Position relative de la France

La France dispose de fortes compétences académiques et d'environ 200 entreprises positionnées sur le diagnostic [6, 9]. Les développements de diagnostic rapide sont essentiellement portés par des laboratoires académiques, des start-up et des PME travaillant sur la convergence de la biologie, des biomatériaux, de la microélectronique et des nanotechnologies. En cela, les acteurs français disposent de moins de ressources marketing, commerciales et de lobbying que les grandes sociétés du diagnostic. Toutefois, Biomérieux, septième acteur mondial du diagnostic, est fortement positionné sur le diagnostic rapide. La position de la France est également variable selon les technologies utilisées. Elle est ainsi en retard dans les laboratoires sur puce, pour lesquels Agilent était le premier. Les États-Unis et le Japon ont globalement une longueur d'avance dans le croisement entre microbiologie, MEMS et microfluidique.

## Analyse AFOM

### Atouts

Des compétences fortes sur les différentes disciplines impliquées ; un réel tissu d'entreprises innovantes.

### Faiblesses

Peu de grands industriels disposant des réseaux commerciaux et de l'influence nécessaire pour avancer sur les verrous d'ordre économique et réglementaire.

### Opportunités

De réels besoins pour du diagnostic en temps réel.

### Menaces

Conservatisme des filières de prise en charge des patients ; difficultés d'obtention d'un remboursement ; concurrence des acteurs américains et de leurs brevets qui peuvent bloquer l'accès au marché (pour les puces notamment).

## Recommandations

- Accélérer les réflexions sur les réglementations à adapter aux technologies de diagnostic rapide, ainsi que sur les prix et le remboursement de ces produits (dans le cas des applications santé).
- Améliorer l'accès à des fonds pour les entreprises développant de telles technologies.
- Encourager les réseaux entre l'ensemble des protagonistes en France pour faciliter leur rapprochement.
- Encourager l'évolution du paysage de la biologie médicale (forces en puissance, capacités de lobbying).

## Liens avec d'autres technologies clés

1

18

23

82

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input checked="" type="radio"/>	Moyen
<input type="radio"/>	Fort



## 84. Technologies pour l'imagerie du vivant

### Définitions

L'imagerie du vivant regroupe l'ensemble des techniques utilisées pour l'acquisition et la restitution d'images à toutes les échelles du vivant, *in vivo* ou *in vitro*, pour des applications en biologie. Le but de l'imagerie est de créer une représentation visuelle de l'information que l'on cherche à étudier. L'imagerie est réalisée à partir de différents phénomènes physiques et repose sur quatre grandes variétés de technologies : les rayons X, les ultrasons, la résonance magnétique, la tomographie par émission de positons (TEP). On distingue également cinq grands types d'imagerie : l'imagerie anatomique, l'imagerie fonctionnelle, l'imagerie interventionnelle, l'imagerie génomique et l'imagerie nucléaire.

### Description

L'imagerie relève de quatre champs technologiques principaux :

- les systèmes de détection dont l'amélioration permet d'augmenter la sensibilité et les résolutions spatiale et temporelle ;
- les technologies de traitement du signal et de l'image qui permettent notamment de superposer des images provenant de plusieurs sources et d'obtenir une vision complète et quasi réelle du patient ;
- les agents d'imagerie ou de contraste (traceurs) qui permettent de fournir des informations biochimiques spécifiques ;
- les technologies qui permettent l'intégration et l'application de l'ensemble des approches méthodologiques afin d'adapter les outils d'imagerie à la résolution de problèmes biologiques et médicaux.

Des développements restent à entreprendre sur l'ensemble de ces champs. Les technologies de traitement du signal et de l'image demandent des vitesses d'acquisition et / ou de traitement de plus en plus rapides et des capacités grandissantes de traitement des flots de données. Par ailleurs, peu de nouveaux agents de contraste sont développés alors qu'il existe de réels besoins. Un autre enjeu clé réside dans la capacité à combiner les différentes méthodes d'imagerie, telles que les rayons X avec la microscopie électronique par exemple.

### Applications

L'imagerie du vivant constitue un outil d'investigation de choix dans tous les secteurs d'application de la biologie (santé, agroalimentaire, agriculture), aussi bien en recherche fondamentale qu'en développement de produits. L'imagerie anatomique ou morphologique permet de visualiser les organes, tissus ou cellules à une échelle macro ou microscopique alors que l'imagerie fonctionnelle (dont l'imagerie métabolique et moléculaire) permet d'étudier le fonctionnement de ces mêmes organismes. L'imagerie interventionnelle s'intéresse quant à elle à la chirurgie peu ou non invasive. L'imagerie génomique regroupe les outils informatiques qui permettront de visualiser de façon compréhensible pour un praticien les informations associées au génome d'un patient. L'imagerie nucléaire est utilisée dans la détection d'émissions photoniques de haute intensité pour la médecine nucléaire.

Le secteur de l'imagerie du vivant connaît un essor considérable. Le marché de l'imagerie médicale est de 5,73 Md\$ en 2009 et est estimé à 6,55 Md\$ en 2012 [50]. Le marché de l'imagerie préclinique est quant à lui estimé à 500 M\$

et le marché des instruments pour l'imagerie moléculaire devrait atteindre 6,6 Md\$ en 2014 [51].

### Enjeux et impacts

Les enjeux de l'imagerie du vivant sont particulièrement importants en santé. L'imagerie fonctionnelle du cerveau permet par exemple d'améliorer la cartographie des fonctions cérébrales. L'imagerie permet également de mieux comprendre les anomalies de développement et de dysfonctionnement mais aussi de réaliser un suivi de l'efficacité thérapeutique du traitement.

Par ailleurs, l'imagerie du vivant constitue un outil de choix dans le développement de molécules, biomarqueurs et produits, pour comprendre les mécanismes biologiques en jeu, étudier les propriétés, l'efficacité et la sécurité associées. En biologie fondamentale, le défi est d'améliorer les connaissances des bases moléculaires du fonctionnement cellulaire, ce qui résulterait en une meilleure compréhension des organismes vivants. Disposer d'équipements d'imagerie du vivant et des compétences associées peut constituer un facteur très différenciant pour les sociétés de service gravitant autour des industries des sciences du vivant, qui n'ont pas toutes les compétences ou les budgets internes pour développer leurs propres plateformes.

### Acteurs

#### Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA (I<sup>2</sup>BM, Leti, Irfu, List), Centre de neuro-imagerie, CNRS (IN2P3 et INST2I), CRIBs, ESRF, Etis, Inra, Inserm (LIneM, LTSI, LIF), Inria, Ircad, Insa Lyon, Institut d'imagerie neurofonctionnelle (IFR 49), Institut des neurosciences (IFR 8), Mircen, NeuroSpin, RMN Biomédical et Neurosciences (IFR 1), Service hospitalier Frédéric Joliot, Société française de radiologie, Soleil, Télécom ParisTech, UCP, ESPCI-ParisTech Université de Rennes
- **Intégrateurs** : Biospace, Guerbet, Mauna Kea Technologies, Quidd, SuperSonic Imagine, Theraclion, Trixel
- **Structures relais** : Alsace BioValley, Cancer Bio Santé, Lyonbiopôle, Medicen, System@tic

#### Principaux acteurs étrangers

- Agfa Healthcare, Bioptics, Digirad, Dilon Technologies, General Electric, MITA (Medical Imaging & Technology), Philips, Siemens

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



## Position relative de la France

La France dispose d'une compétence historique en imagerie du vivant et possède aujourd'hui un ensemble unique au monde de moyens et de compétences en recherche, notamment académique, sur les secteurs de l'imagerie moléculaire et de la modélisation et le traitement des signaux. Des interactions fortes existent également entre les différentes équipes de recherche et développement des domaines clés de la microscopie, en endoscopie et biophotonique. Enfin, plusieurs équipements lourds et plateformes à visibilité internationale tels que le centre de neuro-imagerie NeuroSpin (CEA) et la plateforme d'imagerie Mircen, sont présents sur le sol français, offrant à la France de bonnes capacités en imagerie biomédicale.

Sur le plan industriel, le marché mondial est verrouillé par les trois géants que sont Siemens, Philips et General Electric. Toutefois, de très belles PME françaises se développent, parmi lesquelles pourrait émerger le futur champion français de l'imagerie qui se positionnerait parmi les leaders. SuperSonic Imagine est par exemple aujourd'hui la seule entreprise au monde à proposer un appareil d'imagerie multi-ondes, utilisé en cancérologie. Il faut également noter la position de Guerbet, leader sur le marché des agents de contraste avec 25 % de parts de marché en Europe.

Les pays en pointe en imagerie du vivant sont l'Allemagne, les Pays-Bas et les États-Unis au travers de leurs

trois géants respectifs Siemens, Philips et General Electric. Ces trois entreprises proposent des appareils d'imagerie variés, tels que des scanners ou des systèmes d'imagerie à résonance magnétique (IRM). General Electric propose également des produits d'imagerie interventionnelle. Par ailleurs, la Chine et le Japon sont en pleine explosion, la concurrence internationale s'intensifie.

## Analyse AFOM

### Atouts

Compétences fortes, notamment académiques ; plusieurs équipements à visibilité internationale ; premier pays à proposer un appareil multi-ondes (SuperSonic Imagine) ; un leader européen des agents de contraste (Guerbet).

### Faiblesses

Peu d'industriels présents ; peu de projets collaboratifs ; forts investissements requis.

### Opportunités

Nombreuses applications ; nombreux développements encore attendus, notamment vers des échelles d'observation de plus en plus petites.

### Menaces

Forte concurrence internationale, notamment avec les trois géants de l'imagerie.

## Recommandations

- Structurer les forces de l'imagerie française, en les concentrant sur ses domaines d'expertise reconnus à l'international : optique, technologies ultrasons, aimants pour IRM, détecteurs en physique nucléaire, mathématiques appliquées à l'analyse des données et des images.
- Développer la visibilité des forces françaises, notamment en participant à des initiatives européennes en matière d'imagerie telles que l'Euro-Biolmaging (Esfri) ou l'European Society for Molecular Imaging (Esmi).
- Susciter des projets collaboratifs autour de nouvelles applications et de ruptures technologiques, et en lien avec les organismes de réglementation pour un transfert plus efficace vers des applications cliniques.
- Soutenir le développement des nouvelles sondes et traceurs, ainsi que l'implication des informaticiens et mathématiciens.
- Simplifier l'administration de plateformes d'imagerie françaises.
- Soutenir le développement de bases de données cliniques en imagerie.

## Liens avec d'autres technologies clés

2	13	17
18	20	22
76	77	

### Maturité (échelle TRL)

●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

●	Leader ou Co-Leader
●	Dans le peloton
●	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



# 85. Technologies douces d'assainissement

## Définitions

Les technologies douces d'assainissement ont pour finalités l'asepsie et la préservation des denrées alimentaires aux différents stades de leur cycle de vie : production, distribution et conservation.

Les enjeux liés à ces technologies sont d'abord d'ordre sanitaire. Elles permettent en effet d'améliorer la sécurité sanitaire des aliments, de les rendre plus sûrs (à court terme) mais également plus sains (à long terme), ainsi que de respecter leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques.

Les exigences réglementaires relatives aux impératifs de sécurité sanitaire et au développement durable sont par ailleurs un facteur de croissance des technologies douces d'assainissement. Celles-ci permettent par exemple de diminuer la consommation des effluents dans les procédés de nettoyage des chaînes de production et donc des polluants. Enfin, en rendant les arrêts de chaîne de production moins fréquents pour cause de nettoyage, ce type de technologie a un impact positif sur la productivité de l'industrie.



## Description

Les technologies douces d'assainissement font appel à diverses technologies. Les technologies de traitement de surface permettent, par exemple, de préserver les sols et les installations telles que la chaîne de production, grâce à une modification des surfaces qu'il est possible de rendre bactéricides. Les technologies de confinement permettent, quant à elles, d'éviter la contamination par des poussières par exemple. Enfin, une fois chaque composant de la denrée alimentaire produit séparément, il est nécessaire de les assembler tout en gardant la maîtrise de l'hygiène et de la propreté, ce qui nécessite des technologies d'assemblage adaptées.

Les méthodes de conservation des aliments se font moins agressives et permettent la stérilisation et la décontamination des emballages en ne chauffant pas ou peu l'aliment : les champs électriques pulsés, les hautes pressions et la lumière pulsée qui détruit les micro-organismes en les soumettant aux flashes intenses de lumière en sont des exemples.

Les emballages actifs jouent également un rôle essentiel : ils se trouvent en interaction directe avec l'aliment pour réduire les niveaux d'oxygène, éviter la formation ou préserver les odeurs, augmenter la durée de conservation. On peut distinguer trois types d'emballages actifs : les absorbeurs (d'oxygène, d'humidité, d'éthylène, etc.), les relargueurs d'additifs (anti-microbiens, arôme, etc.) et les préparateurs (actions sur l'aliment pour améliorer sa conservation). Les films alimentaires comestibles permettent par ailleurs de minimiser l'impact des emballages sur

les aliments et peuvent augmenter leur durée de vie. Au niveau technologique, des améliorations doivent encore être réalisées sur la maîtrise des réactions engendrées.

## Applications

Les technologies douces d'assainissement trouvent des applications dans tout le secteur de l'agroalimentaire (alimentation humaine et animale). Elles sont appliquées tout d'abord au niveau des usines et des installations industrielles afin de limiter l'usage des produits chimiques. Elles peuvent également être appliquées au niveau des chaînes de production, dans les circuits de réfrigération ou d'aéroréfrigération, par exemple, afin de répondre aux problèmes de nettoyage. Enfin elles peuvent être utilisées au niveau des produits et des emballages afin de préserver au mieux les aliments.

Au niveau de l'emballage par exemple, alors que le marché mondial de l'emballage ne devrait croître que légèrement – de 429 Md\$ en 2009 à 530 Md\$ en 2014 [52] – le marché mondial des nouveaux emballages émergents (actifs et intelligents) devrait augmenter de 13 % par an pour atteindre 1,1 Md\$ en 2011, dont 39 % sont consacrés à l'alimentaire [47]. En France, le marché de l'emballage représente 19,1 Md€ en 2007, dont 66 % sont consommés par l'industrie agroalimentaire [53].

## Enjeux et impacts

La sécurité sanitaire est essentielle et son non-respect peut avoir d'importantes conséquences économiques :

### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

à titre indicatif, le coût annuel relatif au traitement des personnes infectées par la salmonellose est de 2 Md\$ aux États-Unis [52].

Cependant, plusieurs verrous subsistent. La réglementation Novel Food demande que tout produit issu d'une nouvelle technologie fasse l'objet d'une demande d'autorisation de mise sur le marché qui peut prendre de six mois à deux ans, ce qui rend les industriels frileux aux changements dans leurs chaînes de production. De plus, l'industrie agroalimentaire française est très fragmentée, rendant difficile la coordination entre les différents acteurs. La majorité d'entre eux sont par ailleurs des PME, qui ne consacrent qu'un faible pourcentage de leur chiffre d'affaires à la recherche et au développement, d'où de faibles investissements dans le développement de nouvelles technologies douces d'assainissement.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **R&D / Intégrateurs** : AgroHall d'Evreux, Centre de ressources technologiques agroalimentaires (Agir) de Talence, Claranor, Cryolog, Inra, Institut des sciences et techniques de l'aliment de Bordeaux
- **Plateformes et pôles de compétitivité** : AgriMip Innovation, Aquimer, Céréales Vallée, Food for Life, IAR, Mer Paca, PEIFL, Plastipolis, réseau Actia, Valorial, Vitagora
- **Utilisateurs** : Agronutrition, Bongrain, Danone, Fromageries Bel, Goëmar, Pernod Ricard, Villmorin

## Position de la France

L'industrie agroalimentaire française est le premier secteur national et un leader en Europe et dans le monde, et la France comporte des laboratoires de recherche de pointe. Ces acteurs se sont impliqués très tôt dans le secteur des technologies douces d'assainissement et ont été proactifs dans le domaine.

Des efforts de coordination sont également réalisés, notamment grâce à l'Actia (Association de coordination technique pour l'industrie agroalimentaire) qui se positionne au carrefour de la recherche et de l'entreprise et qui mène des actions collectives d'incitation, de coordination, de maillage et de communication.

Néanmoins, si la France est bien positionnée dans la recherche des technologies douces d'assainissement, le manque d'équipementiers freine leur diffusion parmi les utilisateurs finaux.

Où en sont les autres pays sur la diffusion de cette technologie ?

L'Europe est en général assez avancée dans le domaine, principalement du fait des aspects réglementaires à respecter. Les technologies douces d'assainissement sont diffusantes dans des pays tels que l'Allemagne, l'Angleterre et les Pays-Bas, positionnés au même niveau que la France.

L'Amérique du Sud, et notamment le Chili et l'Argentine, développe également ce type de technologies, permettant ainsi une diffusion croissante.

Aux États-Unis et en Asie néanmoins, les pressions réglementaires sont moins fortes et la recherche et le développement sont moins avancés qu'en Europe, ce qui explique une diffusion moins importante. Notons cependant l'exception du Japon qui a été pionnier sur le développement et la diffusion des technologies douces d'assainissement en agroalimentaire.

### Liens avec d'autres technologies clés

6

16

81

82

## Analyse AFOM

### Atouts

Une industrie agroalimentaire leader européen et mondial ; compétences présentes tant au niveau R&D qu'industriel ; efforts de coordination, notamment grâce à l'Actia.

### Faiblesses

Industrie agroalimentaire française très fragmentée : majorité de PME ; faibles investissements en R&D des industriels (PME et TPE).

### Opportunités

Fortes pressions réglementaires au niveau français et européen ; faible concurrence européenne.

### Menaces

Cadre juridique et législatif, notamment la réglementation Novel Food ; retard par rapport au Japon.

## Recommandations

- Soutenir la mise en place de plateformes de démonstration et / ou de centres techniques, pour sensibiliser les PME aux avantages de ces technologies et démontrer le retour sur investissements.
- Adapter les dispositifs de soutien à l'innovation pour davantage d'éligibilité des entreprises agroalimentaires.
- Pousser à l'harmonisation de l'étude des dossiers Novel Food entre les différents pays, pour ne pas pénaliser les acteurs français dans leur volonté d'intégrer des technologies innovantes dans leurs procédés de production.

### Maturité (échelle TRL)

<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

### Position de la France

<input checked="" type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

### Potentiel d'acteurs en France

<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Les entreprises du médicament, [www.leem.org](http://www.leem.org)
- [2] Snitem, [www.snitem.fr](http://www.snitem.fr)
- [3] Efpia, *The pharmaceutical industry in figures*, 2006, 2007, 2008 et 2009
- [4] Insee, Enquête annuelle des entreprises, Sessi, 2007
- [5] Étude d'IMS Health, repris par le groupe de travail santé des États Généraux de l'Industrie
- [6] États généraux de l'industrie, Groupe de travail santé
- [7] Eucomed, [www.eucomed.org](http://www.eucomed.org)
- [8] European Diagnostics Manufacturers Association, [www.edma-ivd.be](http://www.edma-ivd.be)
- [9] Syndicat de l'industrie du diagnostic *in vitro*, [www.srfl.fr](http://www.srfl.fr)
- [10] Réseau des acheteurs hospitaliers franciliens, [www.resah-idf.com](http://www.resah-idf.com)
- [11] Datamonitor
- [12] Euromonitor International 2008
- [13] Precepta, *Sociétés de recherche sous contrat (CROs) – Stratégies de croissance et positionnement des acteurs*, octobre 2008
- [14] Commission européenne, *Accelerating the development of the e-health market*, 2007
- [15] Attali J., *Rapport de la Commission pour la libération de la croissance française*, XO Editions, la Documentation française, 2008
- [16] Picard R., *Enjeux des TIC pour l'aide à l'autonomie*, 2008
- [17] Asip, *E-santé : une priorité pour la France*, 2010
- [18] Business Monitor International
- [19] Association of Clinical Research Organizations, [www.acrohealth.org](http://www.acrohealth.org)
- [20] Global Business Insights, *The CMO market outlook: emerging markets, key players and future trends*, 2009
- [21] Agence nationale des services à la personne, [www.servicessalapersonne.gouv.fr](http://www.servicessalapersonne.gouv.fr)
- [22] Ministère des Affaires sociales, [www.travail-solidarite.gouv.fr](http://www.travail-solidarite.gouv.fr)
- [23] Comptes nationaux de la santé
- [24] Insee, [www.insee.fr](http://www.insee.fr)
- [25] Association française des diabétiques
- [26] Agreste, [www.agreste.agriculture.gouv.fr](http://www.agreste.agriculture.gouv.fr)
- [27] Technologies clés 2010
- [28] SNIA, [www.nutritionanimale.org](http://www.nutritionanimale.org)
- [29] États généraux de l'industrie, Groupe de travail agroalimentaire
- [30] Eurostat 2010, [ec.europa.eu/eurostat](http://ec.europa.eu/eurostat)
- [31] LEEM et Genopole, *Bioproduction 2008 : État des lieux et recommandations pour l'attractivité française*, 2008
- [32] Alcimed
- [33] Alliance Aviesan
- [34] Stratégie nationale de recherche et d'innovation
- [35] LEEM, *Des cellules pour la santé*, 2010
- [36] John Wiley and Sons, *The Journal of Gene Medicine*, 2010
- [37] Global Industry Analysts, *Gene Therapy: A Global Strategic Business Report*, octobre 2008
- [38] International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA), [www.isaaa.org](http://www.isaaa.org)
- [39] Gadhoun F., *Guerre au sommet sur le marché des vaccins*, Le Figaro, janvier 2008. [www.lefigaro.fr](http://www.lefigaro.fr)
- [40] ITMO, *Microbiologie et maladies infectieuses – Orientations stratégiques*, mars 2010
- [41] Képès F., *Biologie de synthèse et intégrative*, M/S hors série n°2, vol.25, mai 2009
- [42] Note de veille n°136, Centre d'analyse stratégique, *La biologie de synthèse : de la bioingénierie à la bioéthique*, juin 2009
- [43] SPI, UBMC, ATG & CERES, *Synbiology - An analysis of synthetic biology research in Europe and North America*, septembre 2006
- [44] Costa G., *Les organes artificiels en plein essor*, Pulsations, juillet-août 2008
- [45] Agence de la biomédecine, *Les principaux chiffres de la greffe*, 2010. [www.agence-biomedecine.fr](http://www.agence-biomedecine.fr)
- [46] Circulaire du ministère de l'Agriculture et de la Pêche, *10 priorités agro-industrielles de recherche et de développement*, avril 2009
- [47] Freedomia Group, *Active and intelligent packaging*, août 2007
- [48] SMI's 7th annual Point of Care Diagnostics: market adoption and technology trends
- [49] Pipame & Adébiotech, *Réflexion prospective autour des biomarqueurs*, décembre 2009
- [50] Frost & Sullivan, *Medical Imaging Business Outlook during the Recession*, décembre 2009
- [51] Health Imaging & IT, [www.healthimaging.com](http://www.healthimaging.com)
- [52] PikeResearch, *Sustainable packaging*, 2010
- [53] Comité de liaison des industries françaises de l'emballage (Clife), 2008
- LEEM Recherche, *Innovation Santé 2015*, 2007
- ITMO, *Technologies pour la santé – Orientations stratégiques*, mars 2010
- ITMO, *Bases moléculaires et structurales du vivant – Orientations stratégiques*, mars 2010
- ITMO, *Immunologie, hématologie, pneumologie – Orientations stratégiques*, mars 2010
- Legrain Y. *Les biomédicaments : des opportunités à saisir pour l'industrie pharmaceutique*, Avis et rapports du Conseil économique, social et environnemental, 2009

## Des clés pour l'action

Comme cela a été souligné en introduction, l'étude *Technologies clés 2015* n'exonère pas le lecteur qui voudrait s'emparer de ses résultats d'une analyse plus approfondie, notamment en ce qui concerne les perspectives en termes de marchés.

Plutôt qu'une liste exhaustive des technologies qui comptent pour le tissu industriel de notre pays, il faut donc considérer l'ouvrage à la fois comme un ensemble de points de repère et comme un point de départ pour des analyses plus approfondies facilitant le passage à l'action.

Les entreprises qui veulent définir leur stratégie de R&D, qui projettent la réalisation d'un investissement productif, ou qui s'engagent dans une démarche d'innovation – qu'il s'agisse de l'introduction d'une innovation de procédé ou du lancement d'une innovation de produit ou de service – trouveront dans l'étude un éclairage utile sur les applications et les enjeux technologiques et économiques, ainsi que des informations sur les principaux acteurs, notamment les centres de compétences vers lesquels se tourner : en ce sens, *Technologies clés 2015* s'inscrit pleinement dans la « boîte à outils » des politiques publiques nationales en faveur de l'innovation et de la compétitivité des entreprises.

Pour l'État et les collectivités territoriales, comme pour les organisations et entités au service de l'innovation et du développement des entreprises – Oséo, Agence nationale de la recherche, centres régionaux d'innovation et de transfert de technologie, pôles de compétitivité, pôles d'innovation pour l'artisanat et les TPE, chambres consulaires, organisations professionnelles, etc... – l'étude constitue un outil d'aide à la décision, pour la définition des politiques publiques (politique de R&D, politique de soutien à l'innovation, politique de formation...), pour l'orientation des soutiens aux projets d'entreprise, ou encore pour l'organisation d'actions collectives en direction des acteurs économiques (information et sensibilisation aux enjeux de la diffusion technologique, etc...).

## Les investissements d'avenir

Sur la base des conclusions de la commission chargée de définir les priorités stratégiques d'investissement pour l'emprunt national, le président de la République a annoncé le 14 décembre 2009 les modalités de cet emprunt, d'un montant de 35 milliards d'euros. Cinq priorités ont été fixées par le chef de l'État pour le programme d'investissements d'avenir : enseignement supérieur et formation, recherche, industrie et PME, numérique et développement durable. Cet effort sans précédent doit permettre d'induire de 60 à 70 milliards d'euros d'investissements publics et privés dans les cinq domaines prioritaires.

Tous les appels à projets ont été lancés de façon échelonnée sur l'année 2010, et l'analyse des premières candidatures est en cours sous l'égide du Commissariat général à l'investissement, qui veille à la bonne utilisation des fonds mobilisés.

**Les résultats de l'étude technologies diffusantes et d'avenir pourront utilement être utilisés par les experts et les décideurs pour sélectionner les projets les plus en ligne avec la stratégie technologique de la France.**

Le calendrier de l'étude a en effet été adapté pour que ses analyses et ses conclusions soient directement exploitables pour l'analyse des manifestations d'intérêt et des projets déposés.

## Normalisation

Outil d'application volontaire, la norme est un document de référence établi par consensus entre les acteurs d'un marché et approuvé par un organisme reconnu, qui définit des règles et des caractéristiques applicables à leurs activités. Elle est non seulement un élément essentiel de la diffusion des technologies, mais aussi un facteur de compétitivité des entreprises qui auront su infléchir la normalisation vers leur propre standard. L'élaboration des normes constitue donc un véritable levier pour promouvoir l'innovation et améliorer les

performances des entreprises. Elle est d'ailleurs l'objet d'une attention constante des pays dont l'industrie figure parmi les plus compétitives à l'échelle mondiale, car l'élaboration de normes communes est la garantie que le marché disposera d'une taille critique. **Pour une entreprise, s'impliquer dans l'élaboration des normes, c'est se doter d'une capacité d'anticipation pour innover, faire évoluer ses produits et ses pratiques. Pour une PME, savoir exploiter ces opportunités s'avère très efficace. Les commissions de normalisation constituent également un poste d'observation privilégié pour connaître les évolutions du marché, identifier des pistes de développement et accéder à un vaste réseau de partenaires.** La nécessité d'une meilleure implication des entreprises françaises dans les activités de normalisation a été mise en évidence à plusieurs reprises.

## Dimensions sociétales

Le développement d'innovations technologiques doit répondre simultanément à deux types d'attentes sociétales apparemment contradictoires : d'une part, l'aspiration au progrès source de valeur, d'emplois et de bien-être ; d'autre part, le besoin de sécurité et de régulation. Nombre d'inventions et avancées scientifiques et techniques nécessitent des débats, d'où résultent souvent des formes d'encadrement légal ou réglementaire, pour assurer (ou restreindre) le déploiement des technologies de façon compatible avec l'intérêt général, et avec un consensus suffisant des publics concernés : les débats autour de la bioéthique, de la protection de la vie privée dans le contexte du développement des TIC, de la sécurité et de l'efficacité des médicaments, de la création d'organismes génétiquement modifiés, de l'utilisation de surfaces cultivables pour produire des agro-carburants, ou encore les réticences de riverains à l'installation d'éoliennes, illustrent le poids croissant de la dimension sociétale dans le déploiement des technologies. **L'étude n'entend pas entrer dans le détail de chacune des problématiques en cause, ni préempter les conclusions de débats souvent en cours, mais simplement mentionner les domaines où les besoins de régulation se font plus particulièrement sentir.**

## Un enjeu majeur de compétitivité

La mondialisation, élément de contexte incontournable, a mis à rude épreuve le tissu industriel le moins performant de notre pays, avec son lot de délocalisations et de restructurations industrielles. Les atouts de la France à l'exportation reposent principalement sur les produits de haute technologie, ou sur des produits qui, tout en étant issus de secteurs plus traditionnels, disposent d'une image forte et sont innovants. **Le renforcement de la R&D des entreprises et l'innovation sont donc au cœur de la compétitivité, et doivent permettre à notre pays de relever les défis de la mondialisation** : préserver sur notre territoire les activités de R&D, et en attirer de nouvelles, développer de nouveaux types de services qui concourent à la création d'activité et améliorent notre balance commerciale, réindustrialiser en s'appuyant sur des technologies qui améliorent la compétitivité tout en permettant de créer des emplois et de la valeur sur le territoire national dans le respect des engagements européens et internationaux de la France.

## **Quelques explications sur l'échelle des TRL (*Technology readiness level*)**

d'après le plan stratégique de recherche & technologie  
de défense et de sécurité - DGA 2009

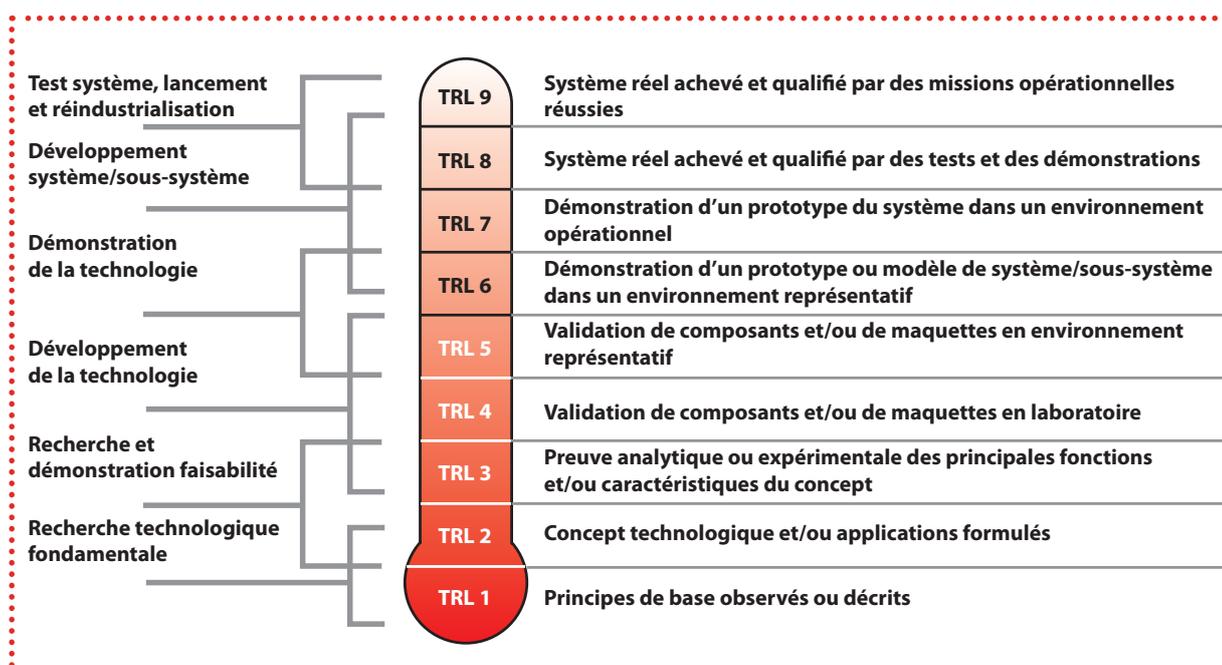
Les TRL forment une échelle d'évaluation du degré de maturité atteint par une technologie. Cette échelle a été imaginée par la Nasa en vue de gérer le risque technologique de ses programmes. Initialement constituée de sept niveaux, elle en comporte neuf depuis 1995 [1] :

L'échelle des TRL a depuis été adoptée par de nombreux domaines, dont celui notamment de la défense, dans le même but principal de gestion du risque technologique dans les programmes, moyennant quelques adaptations minimales (remplacement de la notion d'espace par la notion d'environnement opérationnel).

TRL	Définition	Description	Justification
<b>1</b>	Principes de base observés et décrits.	Plus bas niveau de maturité technologique. La recherche scientifique commence à être traduite en une recherche et développement (R&D) appliquée. Les exemples peuvent inclure des études papier portant sur les propriétés de base d'une technologie.	Publications de travaux de recherche identifiant les principes de base de la technologie. Références relatives à ces travaux (qui, où et quand ?).
<b>2</b>	Concept technologique et/ou application formulés.	L'invention commence. Les principes de base ayant été observés, des applications peuvent être envisagées. Elles sont spéculatives et il n'existe pas de preuve ou d'analyse détaillée pour étayer les hypothèses. Les exemples sont limités à des études analytiques.	Publications ou autres références qui esquissent l'application considérée et fournissent une analyse appuyant le concept.
<b>3</b>	Preuve analytique ou expérimentale des principales fonctions et/ou caractéristiques du concept.	Une R&D active est initiée. Elle comprend des études analytiques, et des études en laboratoire destinées à valider physiquement les prédictions analytiques faites pour les différents éléments de la technologie. Les exemples impliquent des composants non encore intégrés ou représentatifs.	Résultats de mesures en laboratoire portant sur les paramètres essentiels des sous-systèmes critiques et comparaison de ces résultats aux prédictions analytiques. Références relatives à la réalisation de ces tests et de ces comparaisons, (qui, où et quand ?).
<b>4</b>	Validation de composants et/ou de maquettes en laboratoire.	Des composants technologiques de base sont intégrés de façon à vérifier leur aptitude à fonctionner ensemble. La représentativité est relativement faible si l'on se réfère au système final. Les exemples incluent l'intégration en laboratoire d'éléments <i>ad hoc</i> .	Concepts envisagés du système et résultats d'essais de maquettes de laboratoire. Références relatives à la réalisation des travaux (qui, où et quand ?). Estimation des différences entre la maquette du matériel, les résultats des essais et les objectifs du système envisagé.

TRL	Définition	Description	Justification
5	Validation de composants et/ou de maquettes en environnement représentatif	La représentativité de la maquette technologique augmente significativement. Les composants technologiques de base sont intégrés à des éléments supports raisonnablement réalistes, de façon à être testés en environnement simulé. Les exemples incluent l'intégration hautement représentative de composants en laboratoire.	Résultats d'essais d'une maquette de laboratoire du système, intégrée à des éléments supports, dans un environnement opérationnel simulé. Écarts entre environnement représentatif et environnement opérationnel visé. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. La maquette du système a-t-elle été raffinée pour mieux correspondre aux objectifs du système envisagé ?
6	Démonstration d'un prototype ou d'un modèle de système/ sous-système dans un environnement représentatif.	Un modèle représentatif ou un système prototype, allant bien au-delà de celui du TRL 5, est testé dans un environnement représentatif. Cela représente une étape majeure dans la démonstration de la maturité d'une technologie. Les exemples incluent les essais d'un prototype dans un environnement de laboratoire reproduisant fidèlement des conditions réelles ou les essais dans un environnement opérationnel simulé.	Résultats d'essais en laboratoire d'un système prototype très proche de la configuration désirée en termes de performance, masse et volume. Écarts entre l'environnement d'essai et l'environnement opérationnel. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de passer au niveau suivant.
7	Démonstration d'un prototype du système dans un environnement opérationnel.	Prototype conforme au système opérationnel, ou très proche. Ce TRL représente un saut important par rapport au TRL 6, exigeant la démonstration d'un prototype du système réel dans son environnement opérationnel (par exemple dans un avion, dans un véhicule, dans l'espace). À titre d'exemple, on peut citer le test d'un prototype dans un avion banc d'essai.	Résultats d'essais d'un système prototype en environnement opérationnel. Identifications des entités ayant réalisé les essais. Comparaison entre les résultats des essais et les résultats attendus. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de passer au niveau suivant.

TRL	Définition	Description	Justification
8	Système réel achevé et qualifié par des tests et des démonstrations	La preuve est faite que la technologie fonctionne dans sa forme finale, et dans les conditions d'emploi prévues. Dans la plupart des cas, ce niveau de TRL marque la fin du développement du système réel. Les exemples incluent les tests et évaluations du système dans le système d'armes auquel il est destiné, afin de déterminer s'il satisfait aux spécifications.	Résultats d'essai du système dans sa configuration finale confronté à des conditions d'environnement couvrant l'ensemble du domaine d'utilisation. Évaluation de ses capacités à satisfaire les exigences opérationnelles. Problèmes éventuellement rencontrés. Plans, options ou actions envisagés pour résoudre les problèmes rencontrés avant de finaliser la conception.
9	Système réel qualifié par des missions opérationnelles réussies.	Application réelle de la technologie sous sa forme finale et dans des conditions de missions telles que celles rencontrées lors des tests et évaluations opérationnels. Les exemples incluent l'utilisation du système dans des conditions de mission opérationnelle.	Rapports de tests et d'évaluations opérationnels.



# Liste des technologies candidates

**TC 2015** : la technologie candidate à été retenue comme technologie clé.

**I** : la technologie candidate n'a pas été jugée clé comme telle, mais elle a été intégrée dans une technologie clé 2015 de portée plus vaste (système, famille).

**NR** : la technologie candidate n'a pas été retenue comme clé par les groupes d'experts.

## Chimie - Matériaux - Procédés

Noms des technologies	Statut	N°
Biotechnologies blanches	TC2015	3
Bioproduits	I	3
Biomolécules	I	3
Nanomatériaux	I	1
Nanosystèmes	I	1
Technologies pour la miniaturisation	I	4
Catalyse chimique	I	5
Dépôt de couche mince	TC2015	6
Matériaux fonctionnels, de performance	TC2015	7
Modélisation moléculaire, in silico	TC2015	2
Prototypage rapide	TC2015	10
Capteurs	TC2015	8
Élaboration de composites et assemblage multimatériaux	TC2015	11
Procédés membranaires	TC2015	9
Contrôle non destructif / Surveillance intelligente de l'élaboration et de la mise en œuvre des matériaux	TC2015	12
Procédés de transmission du signal	I	22
Physique	I	8
Chimique	I	8
Biologique - Biocapteurs	I	8
Catalyse homogène	I	5
Catalyse hétérogène	I	5
Photocatalyse, électrocatalyse	I	5
Catalyse enzymatique	I	5
Biomatériaux - Biopolymères	I	3
Molécules plateformes	NR	
Complementary metal oxide semi-conductor CMOS	I	23
Transistors couches minces SOI ou nouveaux concepts de MOS, DRAM	I	23
Mémoire embarquée	I	23
Nanoélectronique	I	23
Électronique de puissance, matériaux grand gap	TC2015	65
Électronique organique	I	23
Isolants thermiques	I	71
Mécaniques : chocs, vibrations, sonores	NR	
Méta matériaux pour la transmission de la lumière	I	22
Magnétiques	I	23
Piézoélectrique	NR	
Ferroélectrique	NR	
Mémoires résistives	I	23
Semi-conducteurs III-V	I	23
MEMS	I	23
NEMS	I	23
Photovoltaïque organique	I	49
Hydrogène	I	46

Enzymatique	I	3
Ingénierie métabolique	I	3
Matrice organique (CMO)	I	11
Matrice céramique	I	11
Matrice métallique (CMM)	I	11
RTM, infusion	I	11
Extrusion réactive	NR	
Forgeage <i>net shape</i>	NR	
<i>System In Package</i> (SiP)	I	23
<i>System On a Chip</i> (SoC)	I	23
Assemblage de circuits	I	23
Report de composants	NR	
<i>Time Of Flight Diffraction</i> (TOFD)	I	12
Thermographie	I	12
Shearographie, déflectométrie	I	12
CND de procédés chimique	I	12
<i>Phased Array</i>	I	12
Pulvérisation Plasma, Flamme oxyacétylénique	I	6
<i>Chemical Vapor Deposition</i> (CVD), <i>Atomic Layer Deposition</i> (ALD) et <i>Plasma Enhanced ALD</i> (PEALD), <i>Physical Vapor Deposition</i> (PVD)	I	6
Ablation Laser	I	6
Séparation de gaz	I	9
Traitement de liquide	I	9
Membranes sélectives, «intelligentes»	I	9
Transmission du signal	I	22
Miniréacteurs	I	4
Réacteurs microstructurés	I	4
Réduction du nombre de procédés, Utilisation des nouveaux solvants	NR	
Stéréolithographie	I	10
Microfabrication de composants par impression jet d'encre	I	10
Impression 3D	I	10
Impression «voie liquide»	I	10
Matériaux composites	NR	
Métaux	I	37
Moléculaire	NR	

## Technologies de l'information de la communication

Noms des technologies	Statut	N°
Technologies réseaux sans-fil (3G, 4G, radio logicielle, radio cognitive)	TC2015	14
Robotique	TC2015	13
Réseaux haut débit optiques (fibre)	TC2015	15
Indexation de contenu et technologies sémantiques	I	28
Sécurisation des transactions (cryptographie)	I	25
Réalité virtuelle, réalité augmentée	I	17, 18
Géolocalisation	NR	
RFID et cartes sans contacts	I	16
Image 3D relief (stéréoscopie)	I	17
Gestion et distribution de contenu en ligne (moteur, CDN, codec, etc...)	NR	
Numérisation de contenu	TC2015	24
Écrans tactiles et IHM (téléphone, surface, etc...)	I	29

Objets connectés/objets communicants (M2M, etc. . .)	I	16
Terminaux multimédia connectés (TV, smartphones, etc. . .)	NR	
<i>Green Telecom</i> (via femtocell, antennes intelligentes, etc. . .)	NR	
Réseaux intelligents/auto-configurants/sémantiques	NR	
Applications mobiles	NR	
Logiciel embarqué	I	27
<i>Model Driven Architecture</i>	NR	
SOA	I	25
<i>Open source</i>	NR	
<i>Virtualisation &amp; Cloud Computing</i>	I	25
Communications unifiées	I	29
Portail & Collaboration/ <i>Knowledge management</i>	I	29
Information Management	I	28
Modélisation, simulation, calcul	I	2, 19, 70
Processeurs & systèmes	I	27
SCM	NR	
PLM	I	21, 67, 69, 73
MES	NR	
Intégration de systèmes complexes & ingénierie de système de systèmes	TC2015	19
Intelligence distribuée	I	26

## Environnement

Noms des technologies	Statut	N°
Capteurs pour l'acquisition de données	TC2015	31
Technologies pour la captation maîtrisée des sédiments pollués et pour leur traitement	TC2015	30
Couplage mesure terrestre et mesure satellitaire	I	32
Technologies pour le traitement de l'air	TC2015	34
Technologies de traitement des polluants émergents de l'eau	TC2015	33
Technologies pour la dépollution <i>in situ</i> des sols / sites pollués	TC2015	35
Technologies pour le dessalement de l'eau à faible charge énergétique	TC2015	32
Technologies pour la gestion des ressources en eau	TC2015	36
Technologies pour le recyclage des matériaux rares	TC2015	37
Déconstruction des bâtiments en vue de la valorisation matière sur site	I	72
Technologies de tri automatique et valorisation des déchets organiques	I	38
Valorisation des ressources organiques marines (algues vertes)	I	41
Technologies pour l'exploration, l'extraction et le traitement des ressources minérales	TC2015	55
Éco-conception	TC2015	40

## Énergie

Noms des technologies	Statut	N°
Carburants de synthèse issus de ressources fossiles	TC2015	56
Gazéification	I	41, 57
Solaire photovoltaïque	TC2015	48
Solaire thermodynamique	TC2015	42
Nucléaire de quatrième génération	I	47
Fusion nucléaire	NR	
Piles à combustible	TC2015	44
Pompes à chaleur	I	75
Micro-cogénération	NR	

Technologies de l'hydrogène	TC2015	45
Réseaux électriques intelligents	TC2015	52
Capture et stockage du CO <sub>2</sub>	TC2015	46
Énergies marines	TC2015	43

## Transports

Noms des technologies	Statut	N°
Technologies de stockage et de gestion de l'énergie électrique	TC2015	63
Batteries Lithium-Ion	I	63
Supercapacités et systèmes de stockage intermittent	I	63
Technologies pour les infrastructures de recharge des véhicules	NR	
Propulsion et puissance hybride	I	58
Électronique de puissance	TC2015	64
Mécatronique	TC2015	65
Moteurs à combustion interne	TC2015	58
Moteurs électriques	TC2015	59
Capteurs d'environnement pour la sécurité primaire et la sûreté.	I	66
Communications et systèmes coopératifs	I	66
Interfaces homme-machine, ergonomie	TC2015	61
Sécurité des systèmes de transport	NR	
Maintenance prédictive, télémaintenance	NR	
Outils et méthodes de conception et de validation	TC2015	69
<i>Lean engineering, lean manufacturing</i>	I	67
Matériaux et technologie d'assemblage pour l'allègement	TC2015	68
Fiabilité et sécurité des systèmes embarqués	NR	
Optimisation de la chaîne logistique	TC2015	62
Géolocalisation, traçabilité	I	66
Sécurité et sûreté des grands systèmes	I	19
Maîtrise des sources de bruit	NR	
Matériaux durables de structure	I	68
Processus industriels pour la customisation	NR	

## Bâtiment

Noms des technologies	Statut	N°
Matériaux biosourcés et composites	TC2015	72
<i>Smart metering</i> multifluide	TC2015	74
Maquettes numériques	TC2015	73
Isolants minces performants	I	70
Technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment et de mutualisation	TC2015	75
Systèmes constructifs	TC2015	71
Professionnalisation de la filière	NR	
Systèmes de ventilation et purification de l'air	I	34
Valorisation des déchets	I	72

## Santé, Agriculture et Agroalimentaire

Noms des technologies	Statut	N°
Ultrasons focalisés de haute intensité	NR	
Biologie de synthèse, systémique et intégrative	I	79
Biomarqueurs	I	83
Matériaux biocompatibles	I	80
Organes bio-artificiels et prothèses complexes	I	80
Bioproduction	NR	
Capteurs biologiques	I	82
Médecine régénérative (thérapies cellulaires, tissulaires et cellules souches, thérapie génique)	I	76
Économie de la santé	NR	
Ergonomie	NR	
Imagerie du vivant	TC2015	84
Microsystèmes biologiques	NR	
Modèles animaux prédictifs	NR	
Modélisation in silico	NR	
Robotique médicale et intervention guidée par l'image	I	13, 82, 84
Services à domicile	NR	
Traitement massif des données biologiques et cliniques	I	20
Ingénierie du système immunitaire	TC2015	78
Vectorisation	NR	
Autres technologies pour des approches thérapeutiques non invasives	NR	
Services associés aux nouvelles technologies de séquençage du génome	NR	
Services associés à la télémédecine	NR	
Amélioration de la biodisponibilité des nutriments	NR	
Biotechnologies marines	I	3
Écosystèmes microbiens	TC2015	81
Technologies douces d'assainissement (asepsie et préservation)	TC2015	85
Technologies d'information et de traçabilité	I	16
Engrais naturels, produits phytosanitaires	NR	
Sélections & créations végétales et animales assistées par marqueurs	NR	
Substitution des protéines animales par des protéines végétales	NR	
Chimie combinatoire/prévisionnelle	NR	

## Liste des participants à l'étude :

### Comité stratégique

Denis RANQUE	Cercle de l'industrie
Luc ROUSSEAU	DGCIS
Ronan STEPHAN	DGRI
Pierre-Franck CHEVET	DGEC
Olivier APPERT	IFP
Michel ATHIMON	Alstom
Kevin COGO	Alstom
Nicolas SERRIE	Alstom
Franck HUIBAN	EADS
Catherine LANGLAIS	Saint-Gobain
Vincent CHARLET	ANRT-Futuris
Adeline FABRE	DGEC
Philippe de LACLOS	Cetim
Jacques GRASSI	Inserm
Jean-Claude PETIT	CEA
Christophe MIDLER	École polytechnique
Dominique VERNAY	SYSTEM@TIC
Solange BORIE	Bipe
Patrick LLERENA	Beta
Gabriele FIONI	DGRI
Jean-Pierre DEVAUX	DGA
Jean-Philippe BOURGOIN	CEA
Thierry CHAMBOLLE	Académie des technologies
Richard LAVERGNE	MEDDTL
Robert PLANA	DGRI
Grégoire POSTEL-VINAY	DGCIS
Jacques GRASSI	Inserm

### Comité de pilotage

Grégoire POSTEL-VINAY	DGCIS
Lionel PREVORS	DGCIS
Alexandre DUBOIS	DGCIS
Annie GEAY	Oséo
Jacques ROSEMONT	Oséo
Françoise STRASSER	Adit
Jean-Michel KEHR	MEDDTL
Richard LAVERGNE	MEDDTL
Alain GRIOT	MEDDTL
Ludovic VALADIER	ANR
Armel de LA BOURDONNAYE	MESR
Sylvie METZ-LARUE	DGCIS
Christophe RAVIER	DGCIS
Sylvie RAVIER	DGCIS
Sylvie DONNE	DGCIS
Véronique BARRY	DGCIS
Romain BEAUME	DGCIS
Raymond HEITZMANN	DGCIS
Frédéric KAROLAK	DGCIS
Philippe BAUDRY	DIRECCTE Bretagne
Jean-François MORAS	DIRECCTE Île-de-France
Emmanuel LEGROS	DGA
Patrick HAOUAT	Erdyn
Aurélien COQUAND	Erdyn
Vanessa HANIFA	Alcimed
Nadia MANDRET	Alcimed
Tiffany SAUQUET	Idate
Renaud SMAGGHE	Pierre Audoin Consultants
Mathieu PUJOL	Pierre Audoin Consultants

## Sectoriels de la DGCIS

Jean-Marc GROGNET	DGCIS
Daniel VASMANT	DGCIS
Jean-Paul PERON	DGCIS
Marc ROHFRIETSCH	DGCIS
Caroline LÉBOUCHER	DGCIS
Emilie PIETTE	DGCIS
Annie CALISTI	DGCIS
Aline PEYRONNET	DGCIS
Frédéric SANS	DGCIS
Vincent SUSPLUGAS	DGCIS
Jean-Marc LE PARCO	DGCIS
Emma DELFAU	DGCIS
Roger FLANDRIN	DGCIS
Sylvie DONNE	DGCIS
Emilie SOMBRET	DGCIS
Brigitte SICA	DGCIS
Richard MARTIN	DGCIS
Eric BERNER	DGCIS

## Consultants

Patrick HAOUAT	Erdyn
Stéphane BOUDIN	Erdyn
Olivier FALLOU	Erdyn
Aurélien COQUAND	Erdyn
Vincent BONNEAU	Idate
Tiffany SAUQUET	Idate
Valérie CHAILLOU	Idate
Frederic PUJOL	Idate
Samuel ROPERT	Idate
Alain PUISSOCHET	Idate
Mathieu POUJOL	PAC
Daniel ESTEVES	PAC
Élisabeth de MAULDE	PAC
Renaud SMAGGHE	PAC
Matthias ACCADIA	PAC
Vanessa HANIFA	Alcimed

## Chimie, matériaux et procédés

Fabrice de PANTHOU	AET Group
Georges TAILLANDIER	AFPR
Martha HEITZMANN	Air Liquide
Didier KAYSER	Alcimed
Christian COLLETTE	Arkema
Valerie LUCAS	Association Chimie du végétal
Virginie PEVERE	Axelera
Jean Philippe BOURGOIN	CEA-saclay
Philippe de LACLOS	Cetim
Laurent COUVE	Cetim
Pascal SOUQUET	Cetim
Jérôme KLAEYLE	Chimie du végétal
Nicole JAFFREZIC-RENAULT	CMC2
Cyril KOUZOUBACHIAN	Cofrend
Eric LAFONTAINE	DGA
Philippe MASCLET	DGA
Thierry CHARTIER	ENSCI
Jean-Marc LE LANN	Ensiacet
Michel MATLOSZ	Ensic
Gilbert RIOS	European Membrane House
Jean-Claude CHARPENTIER	Fédération européenne Génie des procédés
Anne IMBERTY	GGMM
Thierry STADLER	IAR
Xavier MONTAGNE	IFP
Pierre MONSAN	Insa Toulouse
Jacques LARROUY	Instituts Carnot
Daniel BIANCHI	Ircelyon
Thierry BARON	Laboratoire des techniques de microélectroniques
Ludovic POUPINET	Leti
Olivier BONNET	Materialia
Jean CURIS	Materis
Caroline FEFTER	Ministère de l'Écologie
Sylvie DUMARTINEIX	Oséo

David POCIC	Pôle Fibres	David PHILIPONA	DGCIS
Christophe RUPP-DAHLEM	Roquette	Julien CHAUMONT	DGCIS
François MONNET	Solvay Research & Technology	Benoit FORMERY	DGCIS
Agnès ARRIVÉ	Techtera	Franck TARRIER	DGCIS
Philippe GIRARD	Total		
Francis LUCK	Total		
Daniel MARINI	UIC		
Jacques BARBIER	Valagro		

## TIC

JL BEYLAT	Alcatel-Lucent
Olivier AUDOUIN	Alcatel-Lucent
Georges PASSET	Bouygues Telecom
Bernard OURGHANLIAN	Microsoft
Viktor ARVIDSSON	Ericsson
Jean-Pierre LACOTTE	Technicolor
Martin MAY	Technicolor
Valère ROBIN	France Télécom
Jean-François CAENEN	Capgemini
Thierry ROUQUET	Arkoon
Yvan CHABANNE	Altran
Ambuj GOYAL	IBM
David AVET	Société Générale
Tony WASSEMAN	Carnegie Mellon
Bernard ODIER	Inria
David MONTEAU	Inria
Thierry COLLETTE	CEA-List
Michaël FOURNIER	Systematic
Françoise COLAITIS	Cap Digital
Yves le MOUEL	FFT
Anne DARNIGE	Oséo
Jacques BLANC-TALON	DGA
Arnaud RIVIÈRE de LA SOUCHÈRE	DGCIS
Laure DUCHAUSSOY	DGCIS
Fabien TERRAILLOT	DGCIS
Alain-Yves BREGENT	DGCIS
Mireille CAMPANA	DGCIS

## Environnement

Philippe GISLETTE	Cirse
Éric LESUEUR	Véolia
Jacques VARET	BRGM
François MOISAN	Ademe
Philippe FREYSSINET	ANR
Thierry CHAMBOLLE	Suez
Ian CLARK	DG Environnement
Diane d'ARRAS	European Technology Platform for Water
Eddo HOEKSTRA	JRC of the European Commission

## Énergie

Daniel CLEMENT	Ademe
Stéphane SIGNORET	Atee
Abdelkrim BENCHAIIB	Gimelec
Yves MARÉCHAL	Institut Carnot-Énergies du futur
Joachim RAMS	Institut Carnot-ARTS
Michel SARDIN	Institut Carnot-ICEEL
Thomas SENNELIER	Oséo
Guy HERROUIN	Pôle Mer Paca
Bogdan ROSINSKI	Pôle S2E2
Jérôme FINOT	Pôle S2E2
Paul LUCCHESI	CEA
François KALAYDJIAN	IFP
Olivier APPERT	IFP
Patrick LE QUÉRÉ	CNRS
Jean-Michel DURAND	SAFT
Robert BOZZA	Véolia

Jacques VARET	BRGM	Pierre-Étienne GAUTIER	SNCF
Patrick CANAL	Atee	Jacques RENVIER	Snecma
Nicolas de MENTHIÈRE	Cemagref	Xavier LECLERQ	STX France
Guillemette PICARD	Schlumberger	Olivier de GABRIELLI	Thésame
Bernard SCHERRER	EDF	Gérard-Marie MARTIN	Valéo
François FUENTES	Air Liquide	Jean-Pierre BUCHWADER	Véhicule du futur
Didier MARSACQ	CEA Liten	Patrick LEFEBVRE	Ville de Paris
Raffaele LIBERALI	Commission européenne		
Olivier DELMAS	Ineris		
Romain VERNIER	BRGM		
Jean-Michel KEHR	MEDDTL		
Caroline FEFFER	MEDDTL		
Émilie BABUT	MEDDTL		

## Bâtiment

Didier ROUX	Saint Gobain
Jacques ROSEMONT	Oséo
Paul ACKER	Lafarge
Pierre ROSSI	Laboratoire central des ponts et chaussées
Christian COCHET	Institut Carnot CSTB
Philippe GUESDON	ArcelorMittal
Arnaud MUSSAT	Bouygues
Philippe MARÉCHAL	CEA Liten
Nathalie SOCKEEL	Eco Logis Innovation
Jean-Luc DORMOY	EDF
JP BARDY	MEDDTL
Jacques ROSEMONT	Oséo
Claude LE PAPE	Schneider
Jean-Pierre HAMELIN	Solétanche-Bachy
Sven SAURA	Véolia Propreté
Christophe GOBIN	Vinci
Michel COTE	Advancity (pôle de compétitivité)
Pierre MIT	Untec
Dominique BARNICHON	Académie de Paris
Georges-Henri FLORENTIN	FCBA
David POCIC	Fibres Grand'Est
Guillaume JOLLY	Industries et Agro-Ressources
Hervé CHARRUE	Institut Carnot CSTB
Jean-Michel GROSSELIN	MEDDTL
Philippe JORDAN	Pôle Alsace énérgivie
Bogdan ROSINSKI	S2E2

## Transports

Agnès PAILLARD	Aerospace Valley
Alain JULLIEN	Alstom
Gérard LARUELLE	Astech
Simon COUTEL	Cofiroute
Yannick ANNE	DGA
Emmanuel CLAUSE	DGCIS
Victor DOLCEMASCOLO	Dirif
Jamel CHERGUI	Eurocopter
Jean-Charles SARBACH	FIEV
Corinne LIGNET	Gifas
Xavier MONTAGNE	IFP
Jean DELSEY	Inrets
Yves RAVALARD	I-Trans
Pascal NIEF	LUTB
Fabien PARIS	MEDDTL/DGITM
Marc CHARLET	Mov'éo
Arnaud ACHER	NOV@LOG
Benoît JEANVOINE	Oséo
Olivier PAJOT	PSA
André PÉNY	RATP
Jacques HÉBRARD	Renault
Bernard FAVRE	Renault Trucks

**Santé, agriculture et agroalimentaire**

Gilles BLOCH	CEA	Jean-Christophe OLIVO-MARIN	Institut Pasteur
Jean-Paul PÉRON	DGCIS	Catherine SAUVAGEOT	ProPackFood
Marc RICO	DGCIS	Maurice BARBEZANT	Unceia
Jean-Marc GROGNET	DGCIS	Hedwige SCHAEPELYNCK	AtlanpoleBiotherapies
Marc ROHFRITSCH	DGCIS	David SOURDIVE	Medicen (pôle de compétitivité)
Jean-Yves BONNEFOY	Transgene	Étienne VERVAECKE	Nutrition-Santé-Longévité (pôle de compétitivité)
François BALLEST	Sanofi-Aventis	Philippe TCHENG	Sanofi
Françoise DELABAERE	Qualitropic	David WARLIN	Ipsen
Manuel TINLOT	Oséo	Jacque BERTHE	Eurobiomed (pôle de compétitivité)
Anthony PUGSLEY	Institut Pasteur	Philippe CLEUZIAT	Lyon biopôle (pôle de compétitivité)
Patrick ÉTIÉVANT	Inra Dijon	Michel PINEL	Valorial (pôle de compétitivité agroalimentaire)
Corinne ANTIGNAC	HôpitalNecker-Enfants Malades	Ariane VOYATZAKIS	Oséo
Annette FREIDINGER	Ensaia	Virginie FONTAINE-LENOIR	Oséo
Nicolas GAUSSERÈS	Danone Vitapole	Christine MICHEL	Cepia Inra
Max REYNES	Cirad	Daniel VASMANT	DGCIS
Mathias FINK	Supersonic Imagine	Thierry DAMERVAL	Inserm
François KÉPÈS	Genopole	Jacques GRASSI	Inserm
André CHOULIKA	Collectis	Isabelle DIAZ	LEEM
Gilles VERGNAUD	DGA	Patrice ROBICHON	Pernod Ricard
Marie-Hélène CHASSAGNE	Fromageries BEL		
Pierre TAMBOURIN	Genopole		
Isabelle VILLEY	Institut de la vision		

Crédits photos :

Ademe, IFP, Thales, Immersion, Airbus, Alstom, Fotolia,  
Messier Douty, Renault, CPMOH, Veolia, EDF,  
Lyon Urban Trucks, Snecma, Novartis.