

Technologies clés **2015**

Préface du ministre	6
Avant-propos	8
Introduction	10
Contexte	12
Méthodologie	17

Les technologies clés 2015

Chimie - Matériaux - Procédés	23
1. Nanomatériaux	32
2. Simulation moléculaire	34
3. Biotechnologies blanches	36
4. Microstructuration	38
5. Catalyse	40
6. Dépôt de couche mince	42
7. Matériaux fonctionnels, intelligents et de performance	44
8. Capteurs	46
9. Procédés membranaires	48
10. Fabrication rapide	50
11. Élaboration de composites - Assemblages multimatériaux	52
12. Contrôle non destructif	54
Technologies de l'information et de la communication	59
13. Robotique	74
14. Technologies réseaux sans fil	76
15. Réseaux haut débit optiques	78
16. Objets communicants	80
17. Technologies 3D	82
18. Interfaces homme-machine	84
19. Ingénierie de systèmes complexes et systèmes de systèmes	86
20. Calcul intensif	88
21. Progressive/Intelligent Manufacturing	90
22. Optoélectronique	92
23. Nanoélectronique	94
24. Technologies de numérisation de contenus	96
25. Sécurité holistique	98
26. Virtualisation et informatique en nuages	100
27. Logiciel embarqué et processeurs associés	102
28. Valorisation et intelligence des données	104
29. Portail, collaboration et communications unifiées	106

Bâtiment	233
70. Systèmes d'enveloppe du bâtiment	244
71. Systèmes constructifs	246
72. Matériaux biosourcés, composites et recyclés	248
73. Maquette numérique	250
74. Comptage intelligent	252
75. Technologies d'intégration et de mutualisation des ENR dans le bâtiment	254
Santé, Agriculture et Agroalimentaire	259
76. Ingénierie cellulaire et tissulaire	272
77. Ingénierie génomique	274
78. Ingénierie du système immunitaire	276
79. Technologies pour la biologie de synthèse	278
80. Systèmes bio-embarqués	280
81. Technologies pour la maîtrise des écosystèmes microbiens	282
82. Capteurs pour le suivi en temps réel	284
83. Technologies de diagnostic rapide	286
84. Technologies pour l'imagerie du vivant	288
85. Technologies douces d'assainissement	290
Conclusion	294
Annexes	
Quelques explications sur l'échelle des TRL	296
Liste des technologies candidates	300
Liste des participants à l'étude	305

Environnement 111

30. Technologies pour la captation maîtrisée et le traitement des sédiments pollués	122
31. Capteurs pour l'acquisition de données	124
32. Technologies pour le dessalement de l'eau à faible charge énergétique	126
33. Technologies pour le traitement des polluants émergents de l'eau	128
34. Technologies pour le traitement de l'air	130
35. Technologies pour la dépollution <i>in situ</i> des sols et des sites pollués	132
36. Technologies pour la gestion des ressources en eau	134
37. Technologies pour le recyclage des matériaux rares et leur valorisation	136
38. Technologies de tri automatique des déchets	138
39. Valorisation matière des déchets organiques	140
40. Éco-conception	142

Énergie 147

41. Carburants de synthèse issus de la biomasse	158
42. Solaire thermodynamique	160
43. Énergies marines	162
44. Piles à combustible	164
45. Technologies de l'hydrogène	166
46. Captage, stockage et valorisation du CO ₂	168
47. Énergie nucléaire	170
48. Solaire photovoltaïque	172
49. Énergie éolienne en mer	174
50. Géothermie	176
51. Stockage stationnaire d'électricité	178
52. Réseaux électriques intelligents	180
53. Technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures	182
54. Technologies de raffinage des hydrocarbures	184
55. Technologies pour l'exploration, l'extraction et les traitements des ressources minérales	186
56. Carburants de synthèse issus de ressources fossiles	188
57. Biomasse et déchets : valorisation énergétique	190

Transports 195

58. Moteurs à combustion interne	206
59. Moteurs électrique	208
60. Nouvelles technologies de turbomachine	210
61. Interaction homme-machine, ergonomie	212
62. Optimisation de la chaîne logistique	214
63. Technologies de stockage et de gestion à bord de l'énergie électrique	216
64. Électronique de puissance	218
65. Mécatronique	220
66. Communications et données	222
67. Démarche d'optimisation de l'ingénierie et de la production	224
68. Matériaux et technologie d'assemblage pour l'allègement	226
69. Outils et méthode de conception et de validation	228

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

Dans 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

Des 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

Sortir 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

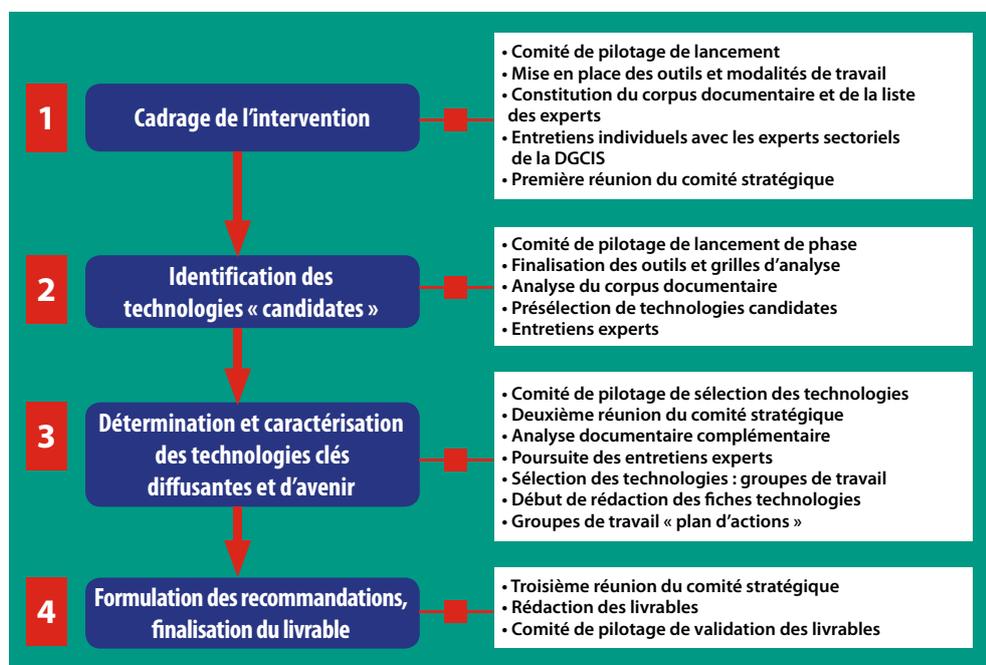
- [1] http://www.strategie.gouv.fr/article.php3?id_article=949
- [2] <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pid20797/la-strategie-nationale-de-recherche-et-d-innovation.html>
- [3] <http://www.etatsgeneraux.industrie.gouv.fr/>

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.

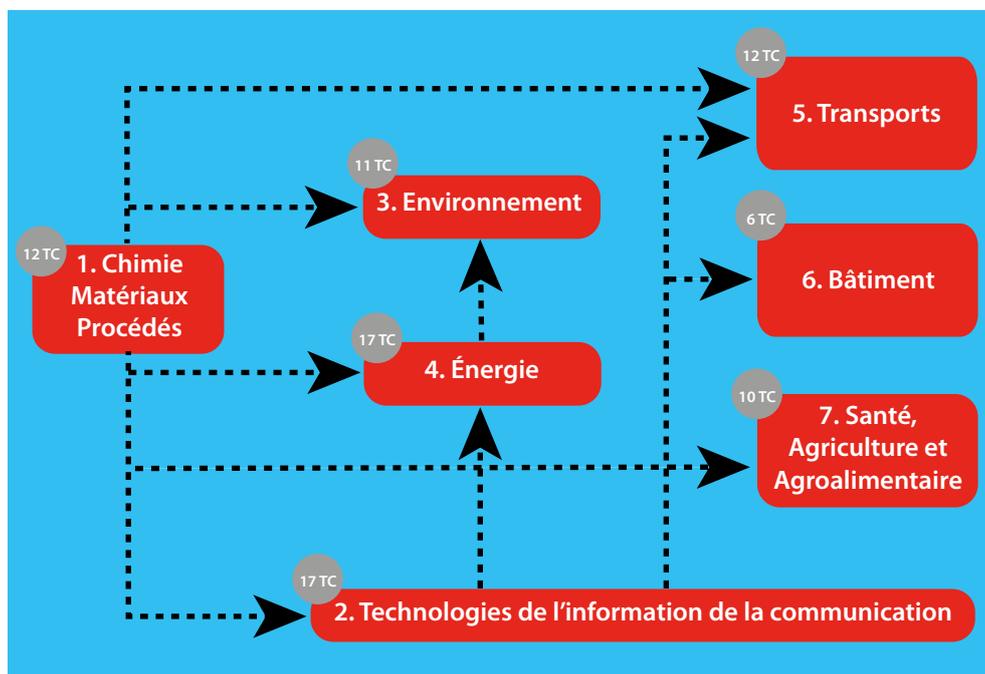
L'ensemble du livrable a été revu, notamment par les membres du comité de pilotage et du comité stratégique, pour en assurer la cohérence et la complétude.

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

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

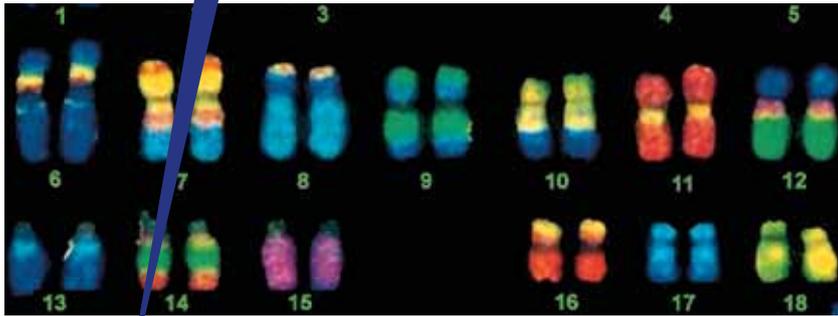
Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

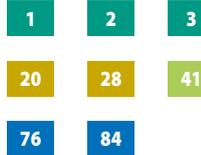
Enjeux et impacts attendus de la technologie

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, Urogen Pharmaceuticals Inc., Vical (États-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 bioinformatique et en bioproduction). Adéquation avec les investissements d'avenir.

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

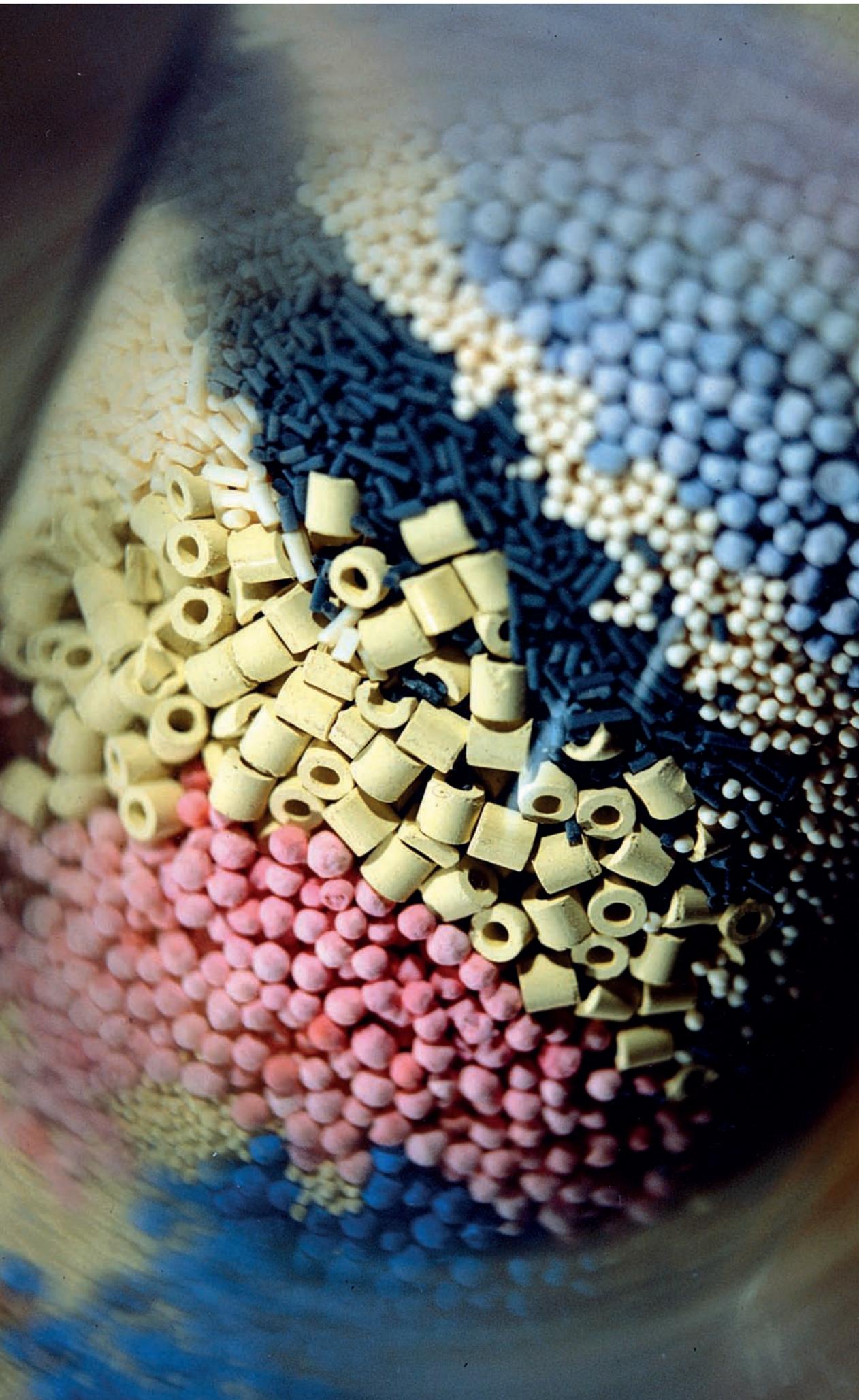
● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort

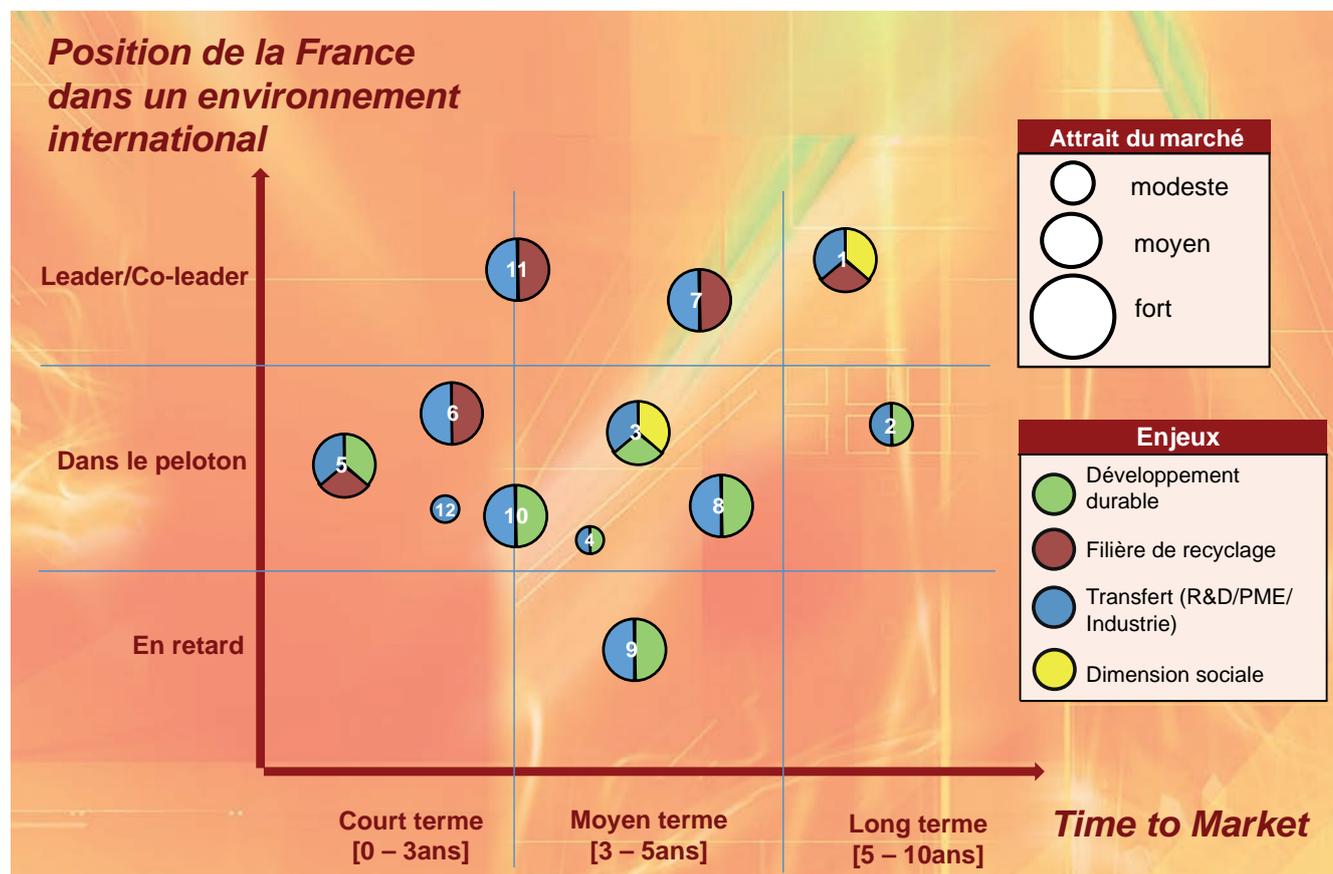
Analyse de la position de la France sur le développement et la diffusion de la technologie

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...

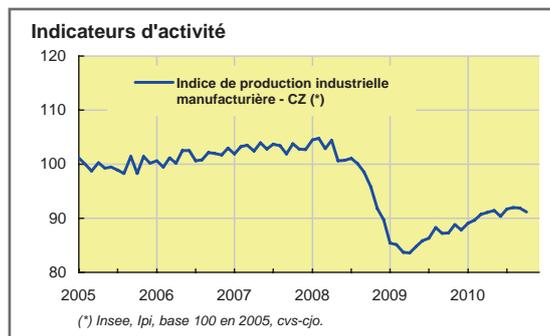
Ce secteur rassemble quatre familles principales : matériaux métalliques et transformation des métaux ; produits minéraux non métalliques ; chimie, caoutchouc et plastiques ; papier et bois. Remarque : seules les familles des biens intermédiaires sont prises en compte (nomenclature statistique). Les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

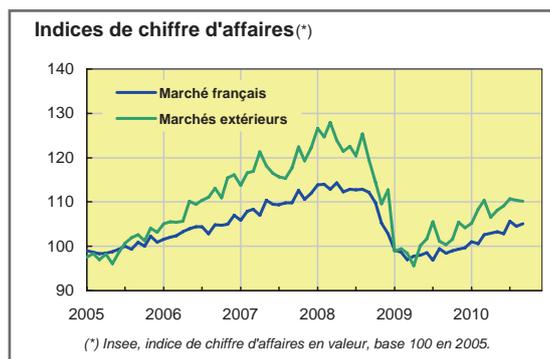
En 2009* En 2010**	CA* HT Md€	Salariés** milliers
Matériaux métalliques et transformation des métaux	78,1	387,2
Matériaux minéraux, caoutchouc, plastiques	58,9	292,7
Chimie	63,8	149,5
Bois et papier	39,8	251,3
Total	240,6	1 044,7



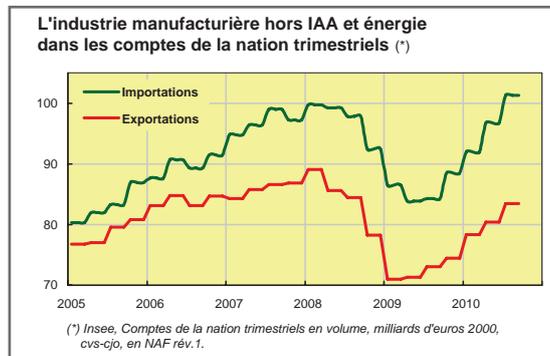
Un secteur qui souffre économiquement...

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

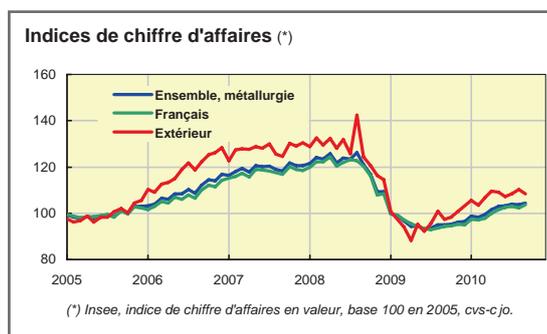
Par sa position « intermédiaire », le secteur de la chimie et des matériaux se doit d'innover fortement pour continuer à soutenir ses secteurs d'applications qui sont aujourd'hui en pleine mutation (allègement dans l'automobile, efficacité énergétique dans le bâtiment, nouveaux matériaux pour les énergies 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	-
Total	78,1	387,2

(*) Insee, estimations DGCI (**) 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

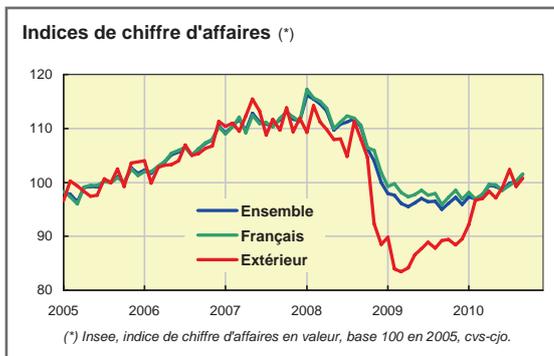
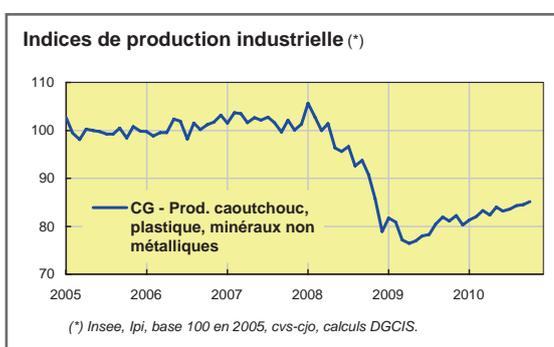
Diminution des dépenses énergétiques : les métaux sont bien évidemment concernés par la problématique développement durable. Sur ce dernier point, les aspects liés aux réductions de consommations énergétiques et aux émissions de gaz à effet de serre concernent aussi bien la production des métaux et des 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	-
Total	58,9	292,7



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.

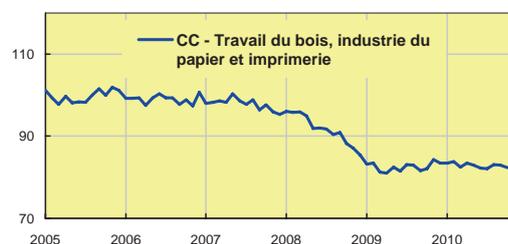
Diminution des dépenses énergétiques : cette industrie de transformation des minéraux nécessite un apport énergétique conséquent (cimenterie, verrerie). Un effort important est engagé à la fois sur la réduction de la facture énergétique et sur la valorisation des émissions de CO₂.



Industrie chimique

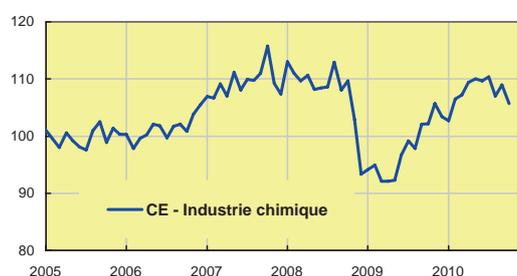
En 2009*	CA*	Salariés**
En 2010**	HT Md€	milliers
Produits chimiques, parfums et cosmétiques		149,5
Produits chimiques de base, azotés et d'engrais, de matières plastiques de base et de caoutchouc synthétique	32,3	-
Savons, produits d'entretien et parfums	17,4	-
Autres produits chimiques et fibres artificielles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

Indices de production industrielle (*)



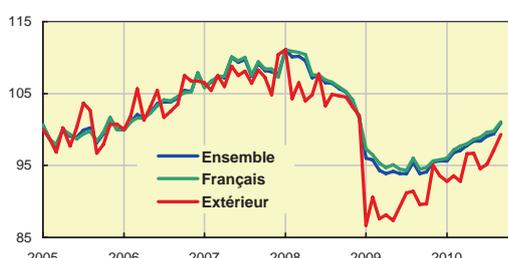
(*) Insee, Ipi, base 100 en 2005, cvs-cjo, calculs DGCIS.

Indices de production industrielle (*)



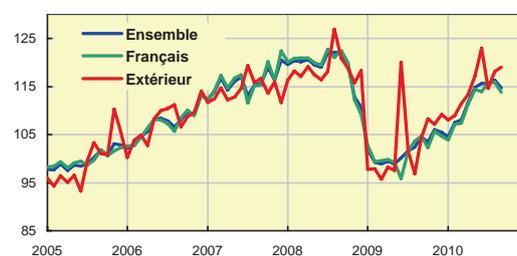
(*) Insee, Ipi, base 100 en 2005, cvs-cjo, calculs DGCIS.

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	-
Total	39,8	215,3

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).

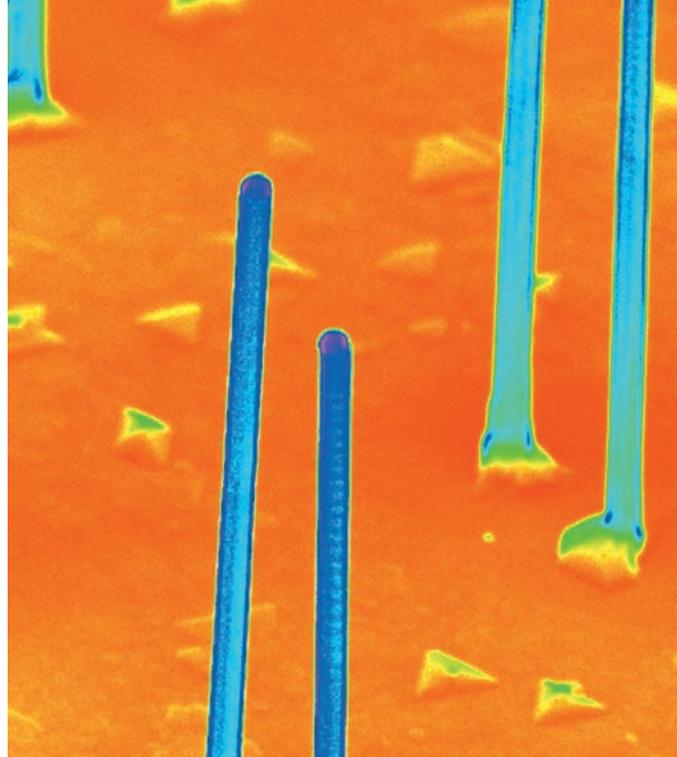
Actuellement, les préoccupations socio-économiques et écologiques poussent au développement de solutions alternatives pour limiter cette dépendance aux ressources fossiles.

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-



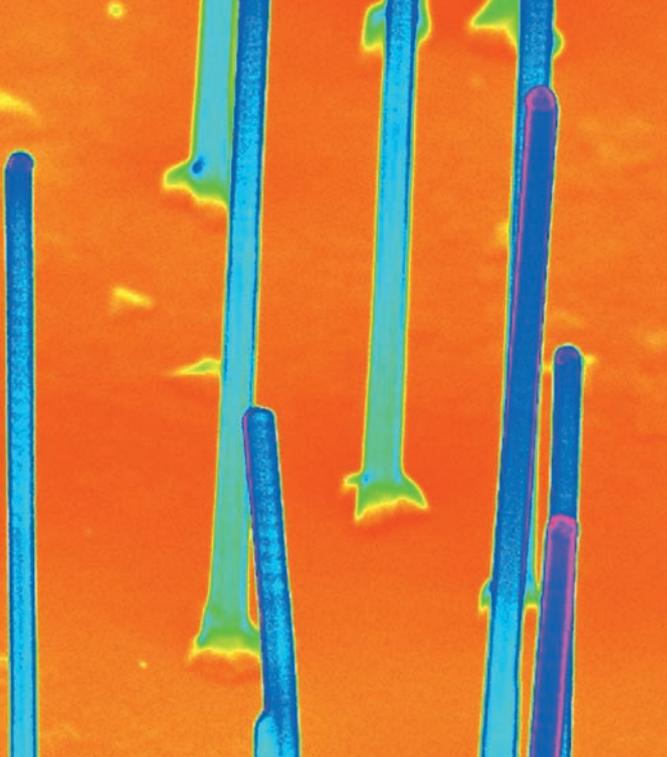
ronnementale » en jouant notamment sur trois leviers principaux. Le premier levier concerne l'amélioration et l'optimisation des procédés existants. Dans ce domaine, les évolutions attendues concernent la mise en place de procédés plus efficaces (meilleur rendement, sélectivité...) permettant une réduction 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).

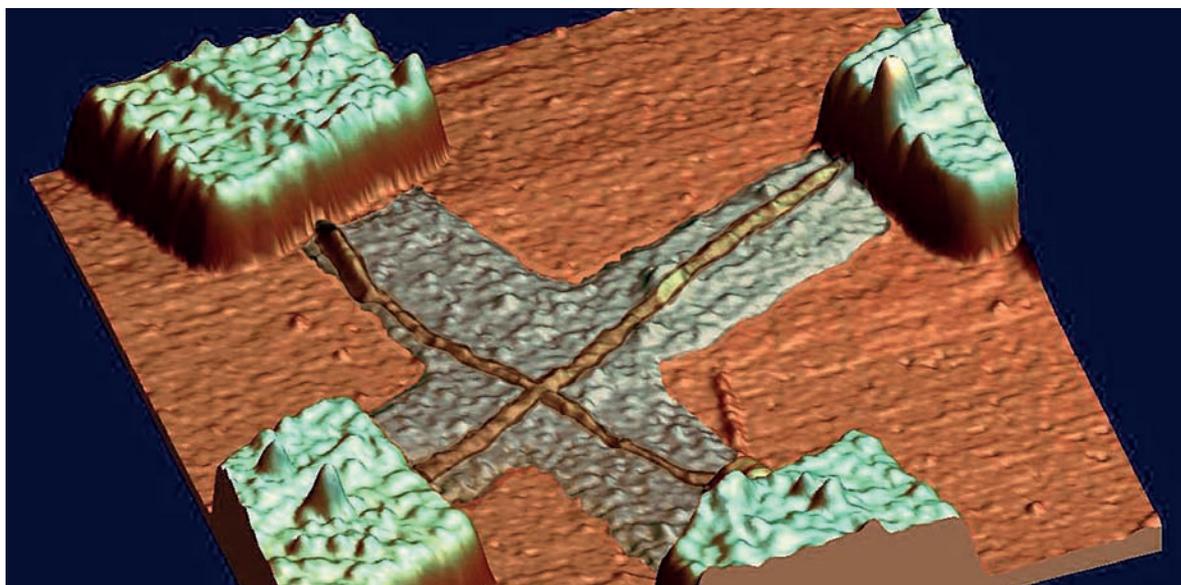
Cas particulier des nanotechnologies : l'analyse de la contribution française aux nanotechnologies est intéressante puisqu'elle montre clairement une contribution importante dans le domaine de la recherche académique (depuis le début des années 1990, la France fait partie des cinq pays majeurs en terme 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].

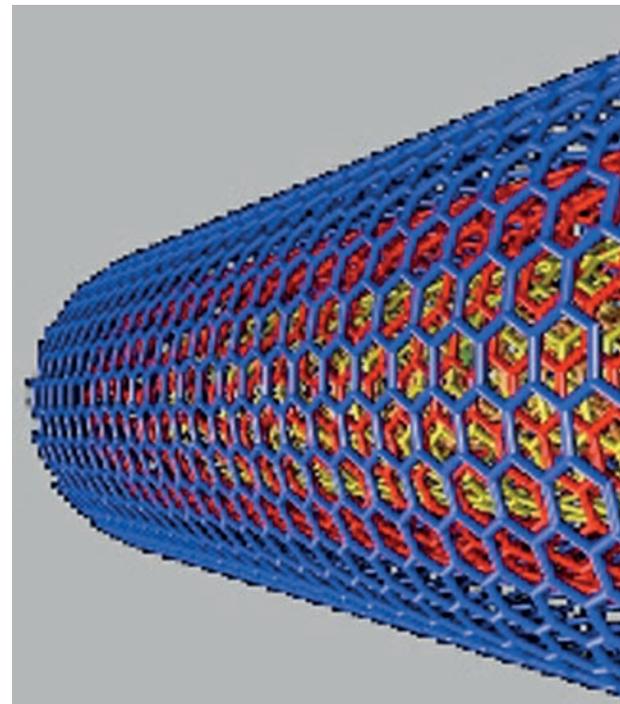
Enjeux et impacts

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

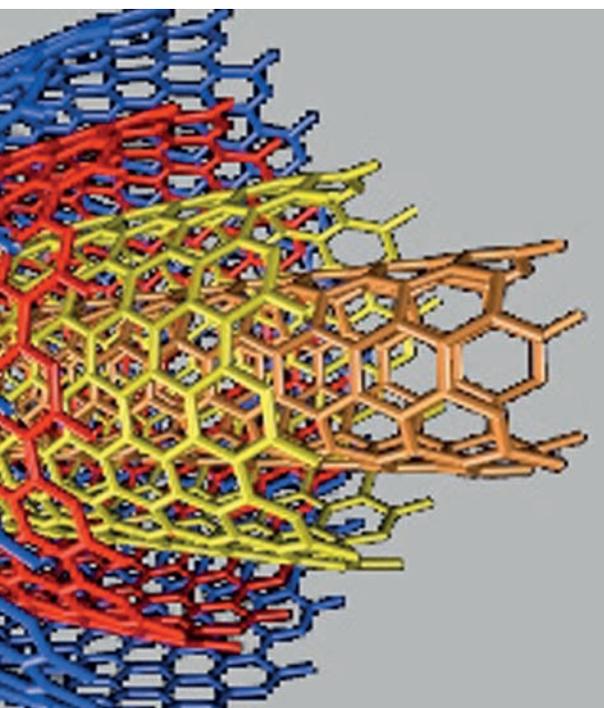
Position de la France

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.

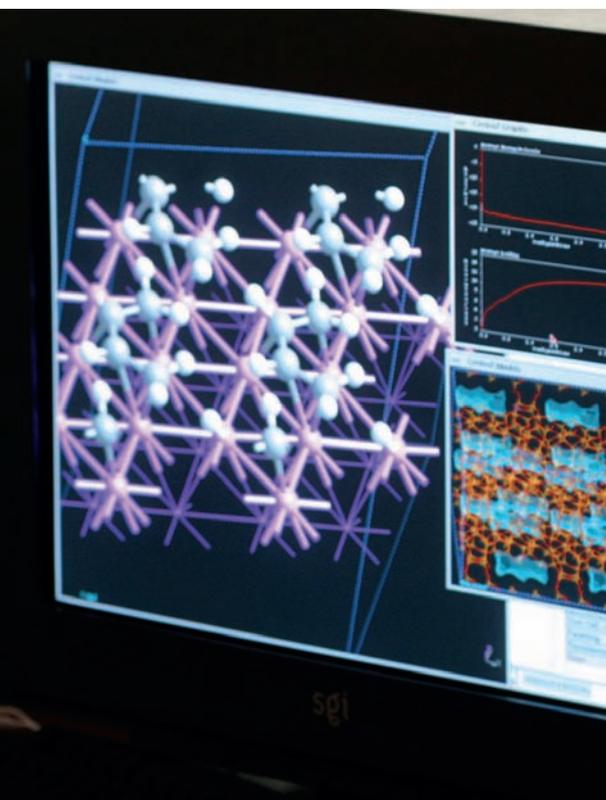
Cependant, le développement de la simulation moléculaire passera par une acceptation au niveau industriel. S'il est indéniable qu'il y a une évolution naturelle vers

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)

● 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



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 bioproduits 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

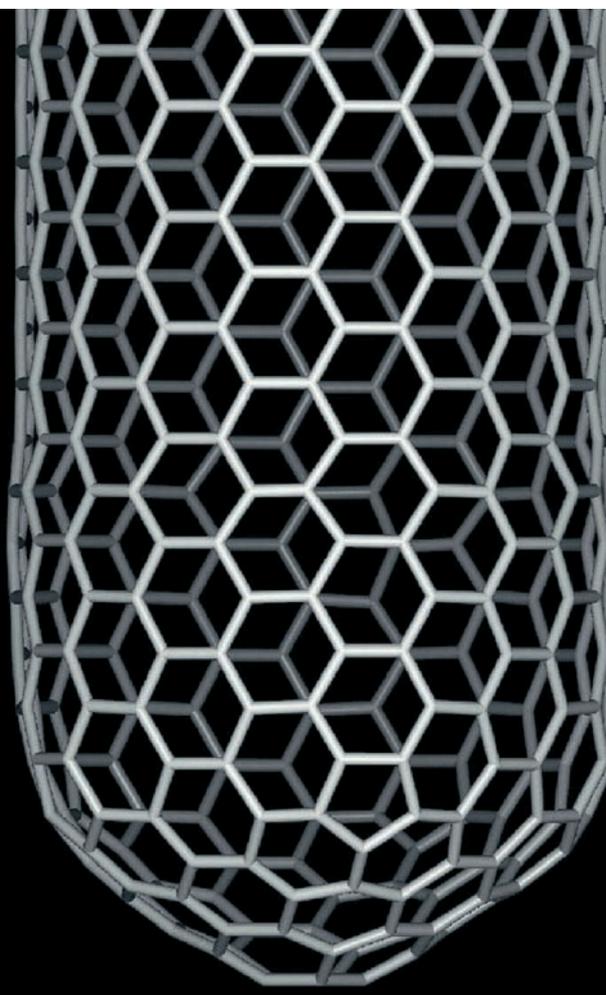
- **R&D** : LRGP, LGC-INPT, LGPC, CEA (GRETh-LETH), CNRS (LAAS)
- **Intégrateurs** : AETGroup, Alfa Laval, Boostec, Corning, Fives Cryogénie, Fluidgent, STMicroelectronics
- **Utilisateurs** : Pierre Fabre, Rhodia, Sanofi
- **Centres de compétences** : Pôle Axelera, IFP Energies Nouvelles, MEPI, PASS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

●	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



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

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- 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
- **Centres de compétences** : Pôles Viameca, Matérialia, 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
- **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

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- 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, Stereao (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).

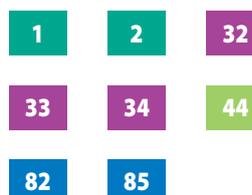
De plus, il s'agit de parvenir à réaliser plus d'échanges entre les milieux professionnels et académiques afin de confronter et rapprocher les envies des laboratoires (avenir) et des industriels (diffusants).

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, ViaMéca 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

<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