

**Ministère de l'Économie,
des Finances et de l'Industrie**

Technologies clés 2010

Les *Éditions de l'Industrie*, Paris 2006
Collection Textes clés

Conformément aux dispositions des articles 40 et 41 de la loi du 11 mars 1957 sur la propriété littéraire et artistique :

- Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, ne peut être effectuée sans autorisation expresse et préalable des Éditions de l'Industrie, service de la Communication, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 139, rue de Bercy, 75572 Paris cedex 12.
- Les copies ou reproductions doivent être strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et les analyses et courtes citations faites dans un but d'exemple et d'illustration.

ISSN : 1263-2856
ISBN 10 : 2-11-096349-2
ISBN 13 : 978-2-11-096349-9

SOMMAIRE

Préface du ministre	5
Avant-propos du président du comité de pilotage	7
Introduction	11
L'exercice technologies clés : un exercice collectif de prospective technologique qui constitue l'un des quatre grands volets de la politique d'innovation	11
Technologies clés et les autres études de prospective technologique	14
Les objectifs de l'étude Technologies clés 2010	17
La méthodologie	18
La réalisation de l'étude	18
La caractérisation des technologies clés	20
Le contexte	23
Au niveau mondial	23
- Les enjeux du changement climatique	25
- Les ressources en eau douce seront-elles suffisantes ?	27
- Vers de futurs chocs énergétiques ?	29
- Les ressources minérales et minières	32
Au niveau européen et français	34
- Le vieillissement démographique	34
- L'emploi à l'horizon 2020	37
- La compétitivité économique	40
Les technologies clés 2010	45
Technologies de l'information et de la communication	49
- Des grands enjeux aux technologies clés	50
- Le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC)	50
1 - Gestion de la microénergie	59
2 - Stockage de l'information numérique	62
3 - Processeurs et systèmes	65
4 - RFID et cartes sans contact	68
5 - Outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information	71
6 - Ingénierie des systèmes embarqués	74
7 - Composants logiciels	77
8 - Infrastructures et technologies pour réseaux de communication « diffus »	80

9 - Virtualisation des réseaux.....	82
10 - Sécurisation des transactions électroniques et des contenus.....	84
11 - Acquisition et traitement de données.....	87
12 - Gestion et diffusion des contenus numériques.....	90
13 - Technologies du Web sémantique.....	93
14 - Interfaces humain-machine.....	96
15 - Modélisation, simulation, calcul.....	99
16 - Réalité virtuelle, augmentée, 3D.....	102
17 - Affichage nomade.....	105
Matériaux - chimie.....	107
- Des grands enjeux aux technologies clés.....	108
- Le secteur des matériaux et de la chimie.....	108
18 - Matériaux nanostructurés et nanocomposites.....	117
19 - Matériaux pour l'électronique et la mesure.....	120
20 - Procédés catalytiques.....	123
21 - Biotechnologies industrielles.....	125
22 - Microtechnologies pour l'intensification des procédés.....	128
23 - Recyclage des matériaux spécifiques.....	130
24 - Fonctionnalisation des matériaux.....	132
25 - Textiles techniques et fonctionnels.....	135
Bâtiment.....	137
- Des grands enjeux aux technologies clés.....	138
- Le secteur du bâtiment.....	138
26 - Systèmes d'enveloppe de bâtiment.....	142
27 - Matériaux composites pour la construction, à base de matériaux recyclés ou de biomasse.....	144
28 - Gestion de l'air dans le bâtiment.....	146
29 - Gestion de l'eau dans le bâtiment.....	148
30 - Technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment.....	150
Energie - environnement.....	153
- Des grands enjeux aux technologies clés.....	154
- Le secteur de l'énergie et de l'environnement.....	154
31 - Systèmes photovoltaïques avec stockage intégré.....	162
32 - Systèmes éoliens avec stockage intégré.....	164
33 - Carburants de synthèse issus de la biomasse.....	166
34 - Réacteurs nucléaires de 3 ^e génération.....	168
35 - Valorisation et distribution de la chaleur à basse température par pompe à chaleur.....	170
36 - Composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré.....	172
37 - Capture et stockage géologique du CO ₂ avec nouvelle conception de centrale à charbon.....	174
38 - Contrôle-commande des réseaux et de la puissance.....	176
39 - Mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents.....	178
40 - Technologies de filtration membranaire (traitement de l'eau).....	180
41 - Automatisation du tri des déchets.....	182
42 - Accélération de la dégradation des déchets fermentescibles et valorisation énergétique.....	184
43 - Traitement des odeurs non confinées.....	186

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire	189
- Des grands enjeux aux technologies clés	190
- Le secteur des technologies du vivant, de la santé et de l'agroalimentaire	190
44 - Transgénèse	198
45 - Thérapie cellulaire	200
46 - Protéomique	202
47 - Thérapie génique	204
48 - Génomique fonctionnelle à grande échelle	206
19 - Techniques de criblage et de synthèse à haut débit	208
50 - Vectorisation	210
51 - Ingénierie des anticorps monoclonaux	212
52 - Vaccins recombinants	214
53 - Alimentation pour le bien-être et la santé	216
54 - Contrôle des allergies alimentaires	218
55 - Imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant	220
Transports	223
- Des grands enjeux aux technologies clés	224
- Le secteur des transports	224
56 - Architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre	232
57 - Travaux d'infrastructures furtifs	234
58 - Infrastructures routières intelligentes	236
59 - Sécurité active des véhicules	238
60 - Architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules	240
61 - Sécurité passive des véhicules	243
62 - Moteurs à pistons	245
63 - Turbomachines	248
64 - Acoustique des véhicules	251
65 - Architecture électrique des véhicules	253
66 - Architecture électronique des véhicules	255
67 - Gestion de l'énergie à bord des véhicules	257
68 - Liaisons de données véhicule - infrastructure	259
69 - Systèmes aériens automatisés	261
70 - Positionnement et horodatage ultraprécis	263
71 - Gestion des flux de véhicules	265
Distribution - consommation	269
- Des grands enjeux aux technologies clés	270
- Le secteur de la distribution et de la consommation	270
72 - Technologies d'authentification	275
73 - Traçabilité	278
Technologies et méthodes de production	281
- Des grands enjeux aux technologies clés	282
- Le secteur des technologies et méthodes de production	282
74 - Contrôle de procédés par analyse d'image	288
75 - Capteurs intelligents et traitement du signal	290
76 - Assemblage multimatériaux	293
77 - Micro et nanocomposants	295
78 - Procédés et systèmes de photonique	298
79 - Nouveaux procédés de traitement de surface	300
80 - Procédés de mise en forme de matériaux innovants	303

81 - Méthodes et outils de coconception.....	305
82 - Ingénierie des systèmes complexes.....	307
83 - Transfert de technologie.....	310
Conclusions et recommandations	313
Les grandes tendances technologiques mises en avant par ce travail	
de prospective technologique	313
L'importance de la normalisation.....	315
Les limites de l'étude.....	315
Les suites possibles de l'étude technologies clés 2010	316
 Annexes.....	 319
Annexe 1 - Liste des participants au projet.....	319
Annexe 2 - Bibliographie sommaire.....	326
Annexe 3 - Priorités technologiques d'autres pays.....	329
Annexe 4 - Les technologies « candidates »	332
Annexe 5 - Liste des disciplines scientifiques.....	340
Annexe 6 - Liste des compétences technologiques et codes CIB.....	341
Annexe 7- Liste des domaines d'application.....	343
Annexe 8 - Liste des pôles de compétitivité.....	344



PRÉFACE

La technologie et l'innovation technologique sont au cœur du développement économique et de l'emploi des pays industrialisés. Le progrès technique est la clé de la compétitivité économique. En transformant les conditions de marché, la technologie remet sans cesse en cause les situations établies, et permet à ceux qui sont en avance de détenir un avantage compétitif. Dans un tel contexte, il est indispensable de pouvoir anticiper ces transformations et les bouleversements qui y sont liés pour s'y préparer et en faire des opportunités, des chances à saisir.

Le ministère chargé de l'Industrie lance périodiquement une étude de prospective technologique qui vise à identifier quelles seront les technologies les plus importantes pour l'industrie française à l'horizon de 5 à 10 ans. La première étude sur les technologies clés est parue en 1995 et la seconde en 2000. Technologies clés 2010 est la troisième version de cet exercice.

En proposant un panorama de l'évolution des différents secteurs économiques et une liste de technologies clés pour la France, ces études ont l'ambition d'être une aide à la réflexion pour les acteurs de l'innovation et un catalyseur pour l'action, en leur permettant de définir des stratégies gagnantes et de collaborer plus efficacement autour de thématiques technologiques porteuses d'avenir.

5

La technologie doit fournir les clés d'un développement durable

Depuis 2002, la politique du Gouvernement de soutien à l'innovation a été redéfinie et considérablement amplifiée : le Fonds de compétitivité des entreprises, que gère la DGE, s'est vu confier le rôle de fonds interministériel unique pour le soutien des pôles de compétitivité par les ministères ; de nouvelles structures ont été créées (ANR, All), d'autres ont vu leur périmètre modifié (Oséo-anvar au sein du groupe Oséo) ; la loi de programme pour la recherche consacre des

moyens importants en faveur des partenariats public-privé et de la valorisation de la recherche. Une nouvelle politique industrielle, construite autour des pôles de compétitivité, d'Euréka et des grands projets innovants de l'All se met en place.

Dans ce nouveau contexte, *Technologies clés 2010* apporte un éclairage sur les changements technologiques des dix prochaines années.

Dans le cadre de ce projet, un peu plus d'une centaine d'experts ont travaillé au sein de huit groupes thématiques. Dans quatre régions, les acteurs locaux du développement technologique ont été impliqués à la réflexion. Qu'ils en soient ici remerciés car sans eux ce rapport n'existerait pas.

Je laisse au lecteur le soin de découvrir plus en détail les résultats de ce travail. Pour ma part, je souhaite souligner quelques points qui me paraissent essentiels :

- À la différence des précédentes études, Technologies clés 2010 a cherché à répondre aux attentes des acteurs locaux du développement économique et technologique. La participation d'un certain nombre d'entre eux au travail d'élaboration traduit cette volonté. Il appartient maintenant aux responsables locaux, s'ils le souhaitent, de se saisir de ce rapport pour en faire un outil au service du développement économique local et construire des actions tant de soutien à l'innovation que de diffusion des technologies les plus modernes dans les entreprises pour en accroître la compétitivité et la création d'emploi. Les directions régionales de l'industrie, de la recherche et de l'environnement et les conseils régionaux seront moteurs pour stimuler les actions locales pour aider nos entreprises, notamment celles de taille modeste, à être pionnières dans la mise au point et l'utilisation des nouvelles technologies. C'est un facteur incontournable de leur compétitivité dans une économie globalisée.

- Le développement technologique est le résultat d'interactions entre les progrès de la science, le choix de technologies élémentaires et leur imbrication dans des systèmes toujours plus complexes, les facteurs humains et sociaux, les stratégies des entreprises. La maîtrise et l'efficacité du développement technologique est dans une grande mesure déterminée par la connaissance de ces interactions et leur contrôle. Les technologies de l'information et de la communication y sont omniprésentes et les biotechnologies s'annoncent comme porteuses de développement considérables. Le facteur temps y est fondamental mais ne s'exprime pas de la même manière selon les domaines technologiques. La notion de système prend une place prépondérante dans l'évolution technologique contemporaine, tout particulièrement dans les pays développés. Nombre de technologies clés identifiées relèvent de cette approche. La seule maîtrise des technologies de base n'est plus suffisante. Les méthodes de conception, d'organisation, de marketing, de gestion des connaissances, sont aussi déterminantes dans le succès d'une innovation que la technologie proprement dite. Ce sont des approches pluridisciplinaires qu'il nous faut promouvoir.

- Les attentes de la société envers la science et la technologie sont toujours aussi fortes. Elles sont multiples, et se manifestent, aujourd'hui, par l'exigence d'un développement technologique plus responsable, permettant à la fois de faire progresser le bien-être et de mieux protéger notre environnement. Nos concitoyens attendent de la technologie les clés d'un développement durable.



François Loos
Ministre délégué à l'Industrie

AVANT-PROPOS

L'étude Technologies clés 2010 s'inscrit dans le prolongement de deux études de même nature qui ont fait l'objet de rapports publiés en 1995 et 2000. Il s'agit à chaque fois d'identifier, à horizon de cinq ans, les technologies clés pour l'industrie française. Il existe donc une certaine continuité de la démarche, mais elle s'accompagne cependant d'une évolution.

L'étude 2010 diffère ainsi des précédentes par la cible retenue qui est, de façon prioritaire mais non exclusive, constituée par les acteurs publics - et singulièrement les acteurs régionaux - impliqués dans la recherche d'une compétitivité industrielle à travers la maîtrise technologique. L'importance de cette dimension régionale a été exprimée, en particulier par quatre réunions de présentations dans les régions Rhône-Alpes, Nord - Pas-de-Calais, Centre et Alsace. Enfin, davantage que dans les exercices précédents, on a abordé les technologies clés sous l'aspect de leur importance pour l'économie française, au-delà de la seule dimension industrielle. On ne peut en effet ignorer que les technologies ont un rôle significatif dans le secteur des services qui représente 70 % du PIB.

Le démarrage de l'étude 2010 a coïncidé avec le lancement de l'appel d'offres gouvernemental pour les pôles de compétitivité régionaux qui a conduit à la labellisation, en juillet 2005, de 66 pôles de compétitivité. L'articulation de l'étude avec cette démarche qui structure le soutien public à l'innovation a reçu une attention particulière. Le rapport précise, pour chacune des technologies retenues, sa relation aux pôles de compétitivité. On observera que la plupart des technologies retenues sont associées à un ou plusieurs pôles, mais que huit d'entre elles sont orphelines. Leur ancrage territorial devra, dans l'avenir, faire l'objet d'une attention particulière.

La transformation rapide du contexte international dans lequel évolue l'industrie française - les effets de la mondialisation de l'économie et de la montée en puissance de la dimension européenne - marque nécessairement toute réflexion sur le développement de l'industrie française et plus généralement de l'économie. La présence de la dimension européenne s'est d'ailleurs traduite concrètement par la présence active, au sein du comité de pilotage, d'un représentant de la Commission européenne. Dans le choix des technologies labellisées, cette prise en compte du contexte international implique non seulement une appréciation de leur importance intrinsèque, mais aussi un jugement sur les atouts dont dispose la France dans chaque cas particulier. En d'autres termes, la procédure de choix confronte d'une part des critères technologiques et d'autre part des critères économiques et stratégiques qu'il convient d'apprécier dans le contexte international.

L'étude dont ce rapport rassemble les résultats n'est nullement un effort isolé. Avec une méthodologie différente, l'étude FutuRis, engagée un an plus tôt et conduite dans le cadre de l'Association nationale de la recherche technique (ANRT), poursuit le même objectif de dynamisation du système français de recherche et d'innovation.

Par ailleurs, la Commission européenne conduit, dans ce domaine, ses propres réflexions. Sur un sujet d'une telle importance, une redondance de la réflexion est en soi souhaitable, mais pour en tirer tout le bénéfice, il est nécessaire que les résultats en soient confrontés, les convergences et les divergences analysées. Il serait particulièrement important de rapprocher l'éclairage national que fournit le présent rapport de la vision européenne élaborée par la Commission. C'est là un prolongement naturel et une forme d'exploitation de l'étude qui s'achève.

Comment caractériser les tendances qui se dégagent de l'étude 2010 ? La sélection de 83 technologies, parmi les quelque 250 qui ont été examinées, se fonde sur le travail d'une centaine d'experts et sur une méthodologie qui est explicitée dans le corps du rapport. On ne saurait prétendre que la sélection présentée a la nature d'une vérité absolue, mais on peut affirmer qu'elle constitue un résultat robuste. On y discerne, et c'est une tendance qui ne peut que s'accuser dans l'avenir, une montée en puissance des technologies qui ont pour objet de réduire les externalités négatives ou, le cas échéant, de les monétariser. C'est l'effet d'une sensibilité accrue aux atteintes à l'environnement, qu'il soit global ou local, et à la rareté croissante de certaines ressources. Le poids des enjeux environnementaux tend à privilégier, dans le processus de sélection, les technologies « économes » par rapport aux technologies de rupture.

8

Par ailleurs, on a souvent choisi de désigner comme clés, plutôt que des technologies trop spécifiques, des systèmes qui reposent sur plusieurs briques technologiques plus étroites. Cela résulte de la prise en compte de critères économiques dans les choix et du fait que le maintien de la compétitivité des pays développés, et singulièrement de la France, repose sur la maîtrise des systèmes complexes davantage que sur celle de composants technologiques très spécifiques. Il en est résulté que la liste des technologies clés 2010 est, avec 83 éléments, plus restreinte que celle établie en 1995 pour 2000 (136 technologies) et en 2000 pour 2005 (119 technologies). Cela explique également que la plupart des technologies clés sont liées à plusieurs pôles de compétitivités qui détiennent les briques technologiques pertinentes. Enfin, le faible pourcentage de technologies de rupture tient à ce que, contrairement à l'étude FutuRis qui est plus centrée sur la recherche, l'étude Technologies clés 2010 s'intéresse prioritairement à ce qui sort des laboratoires pour être industrialisé dans les prochaines années.

Il ne me semble pas déplacé d'examiner les voies de l'avenir d'une étude qui elle-même est tournée vers le futur. On peut aborder de deux façons cette démarche d'autoprospective et se demander :

- Quelles utilisations peut-on faire des résultats de l'étude ?
- Quel regard rétrospectif et critique peut-on porter sur la démarche et quelles conclusions peut-on en tirer pour la suite de l'effort engagé par le ministère chargé de l'Industrie ?

Sur le premier point, il faut reconnaître que la valeur de la démarche n'est pas tout entière contenue dans la sélection des technologies les plus prometteuses et qu'elle ne saurait être tout entière enfermée dans un rapport de synthèse. L'information contenue dans ce rapport

ne représente qu'une faible fraction de celle qui a été rassemblée pour le préparer et qui était accessible pour les participants à l'étude - experts et membres du comité de pilotage - sur le site Internet créé à cette occasion.

C'est ainsi que les informations relatives aux technologies qui ont été écartées par le processus de sélection sont absentes du rapport. Au total, il a fallu rassembler et organiser une grande masse de données et de réflexions dont il me semble essentiel d'examiner comment elle pourra être complètement valorisée. En 1995, la direction générale des stratégies industrielles avait conduit une étude analogue qui avait donné lieu non seulement à un rapport de synthèse, mais à un gros livre intitulé *Annuaire des technologies clés*. Je souhaite qu'une démarche analogue vienne prolonger l'étude en cours ; mais, depuis cette époque, les techniques informationnelles ont évolué ; le livre n'est plus, aujourd'hui, le seul moyen de donner accès à l'information rassemblée par l'étude. Le site Internet établi pour sa conduite, et qui a servi de lien entre les nombreux acteurs impliqués, serait facile à transformer en un outil permanent de communication avec l'ensemble des acteurs du tissu technico-économique.

Un des avantages de ce mode de communication est sa grande facilité d'accès dont bénéficierait tout particulièrement la cible importante que constituent les PME. Cet acteur majeur de l'innovation est peu muni, en termes de temps et de moyens humains disponibles, pour rechercher les informations qui pourraient lui être utiles. Toute démarche de nature à lui faciliter leur accès doit donc être favorisée. La création d'un site Internet permanent, accessible par le portail du ministère chargé de l'Industrie irait certainement dans ce sens et, plus généralement, permettrait de juxtaposer, à l'effort investi pour constituer un gisement d'information au niveau central, un effort complémentaire pour promouvoir sa diffusion dans le tissu économique et industriel.

L'existence d'un site Internet poserait immédiatement la question d'un mécanisme de mise à jour, ce qui nous conduit à la question de la continuité. Je pense qu'il faut s'interroger sur le point de savoir si l'effort entrepris doit s'arrêter complètement à l'issue de l'étude telle qu'elle est définie, pour être repris dans cinq ou dix ans, ou s'il ne serait pas mieux adapté au suivi de l'évolution technique de maintenir un niveau d'activité modeste mais permanent, appuyé sur un réseau réduit d'experts. Si l'outil de communication choisi est le site Internet qui, à la différence du livre, non seulement se prête aisément à des mises à jour mais exige qu'elles soient faites, une convergence entre les deux propositions que je viens de formuler sera aisée à établir.

Cette question de la pérennisation de l'effort d'étude a été évoquée au cours des réunions du comité de pilotage et lors de la réunion de l'ensemble des experts qui s'est tenue à Bercy le 3 octobre 2005. Il resterait naturellement à en arrêter le niveau et à en préciser le contenu : constitution d'un noyau dur d'experts, animation du site Internet, événements de communication, déclinaisons régionales en liaison avec les Drire. Sans chercher, à ce stade, à aller plus loin dans la définition précise de la démarche, disons qu'elle devrait s'inspirer, dans sa continuité, du dynamisme permanent de l'évolution technique, qui jamais ne s'arrête.

André Lebeau

Président du comité de pilotage



Introduction



Alors que les pays développés sont confrontés à de nouveaux défis (mondialisation, délocalisations, tensions sur les cours de certaines matières premières, émergence de nouvelles puissances économiques...), un axe stratégique ne fait plus débat aujourd'hui pour ces économies : l'impérieuse nécessité de l'innovation. Cette prise de conscience a conduit à la mise en œuvre de plusieurs initiatives, notamment au niveau européen : formulation des « objectifs de Lisbonne », renforcement du Programme cadre de recherche et développement...

En France, un nouveau dispositif public s'est progressivement mis en place depuis 2004 : l'enjeu étant d'améliorer le système français de recherche et d'innovation (SFRI). L'évolution des aides à l'innovation (statut de jeune entreprise innovante, amélioration du crédit d'impôt recherche,...), la mise en place de l'ANR (Agence nationale de la recherche) et de l'AIL (Agence de l'innovation industrielle), le lancement du Pacte pour la recherche sont quelques-unes des mesures phares récentes.

L'exercice de prospective du ministère chargé de l'Industrie sur les technologies clés participa à ce dispositif. Il constitue un outil pour la définition de priorités technologiques et à ce titre est l'un des éléments importants de la politique française en faveur de l'innovation.

11

L'exercice technologies clés : un exercice collectif de prospective technologique qui constitue l'un des quatre grands volets de la politique d'innovation

La politique d'innovation mise en œuvre par le gouvernement s'appuie sur quatre grands volets qui sont l'accompagnement financier global des entreprises qui innovent, le soutien aux projets de R&D, le renforcement des liens entre la recherche publique et les entreprises et la prospective technologique.

L'accompagnement financier global des entreprises qui innovent

Deux grands types de mesures ont été mises en place :

- **des mesures de soutien aux investisseurs** dans des entreprises innovantes :
 - la **société unipersonnelle d'investissement à risque (SUIR)**. Adoptée en 2003 et améliorée en 2005, cette mesure a pour objectif d'offrir un cadre juridique adapté aux **business angels** ou investisseurs providentiels plus simple que la société par action simplifiée (SAS) ou la société de capital risque (SCR). Elle vise également à développer cette catégorie d'investisseurs qui est proportionnellement dix à vingt fois moins représentée en France que dans les pays anglo-saxons et qui est au cœur de la problématique des entreprises de taille moyenne.

La SUIR permet aux investisseurs d'apporter leurs capitaux et leur expérience aux jeunes entreprises et de bénéficier d'une exonération d'impôt sur les sociétés pendant dix ans, et d'impôt sur le revenu en tant qu'associé unique pendant la même durée ;

– **les fonds communs de placement à risque (FCPR) et les fonds communs de placement innovants (FCPI)** sont également des véhicules utilisés par les investisseurs, qui bénéficient d'une fiscalité favorable ;

• **des mesures de financement pour les entreprises**, autour de deux dispositions essentielles :

– l'aide aux projets des **jeunes entreprises innovantes (JEI)**, pour les PME de moins de huit ans, indépendantes d'un groupe et consacrant plus de 15 % de leurs charges à la recherche et au développement. Il s'agit d'une exonération des taxes locales (si elle est votée par les collectivités concernées) et d'une exonération des cotisations sociales patronales pour les salariés et mandataires sociaux participant à la recherche, ainsi que d'allègements d'impôt sur les bénéfices. Sur deux ans (2004-2005), cette mesure a concerné au total déjà environ 1 300 entreprises ;

– **le crédit impôt recherche** est une incitation fiscale au développement de la recherche scientifique et technique des entreprises. Le crédit d'impôt recherche consiste en une réduction d'impôt sur les sociétés. Fortement amélioré dans la loi de finances 2006, il est égal à la somme d'une part en volume de 10 % des dépenses de recherche et développement engagées sur une année et d'une part en accroissement de 40 % de la différence entre les dépenses de recherche d'une année minorée de la moyenne des dépenses des deux années précédentes. Il est plafonné à 10 M par entreprise et par an et tient compte pour partie des dépenses de recherche sous-traitée.

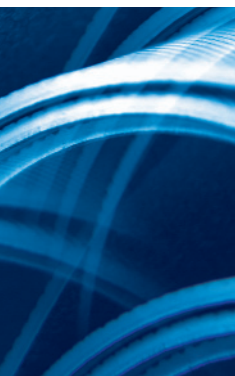
Le soutien ciblé aux projets de R&D

Depuis le début de l'année 2005, le gouvernement a procédé à une mise à plat de son dispositif de soutien à la R&D des entreprises. À côté des acteurs existants, de nouveaux organismes sont apparus pour aider spécifiquement le développement des projets stratégiques de R&D.

Ces organismes ont des vocations différentes, selon la taille des projets, leur nature et le type de coopération avec le secteur public. Le tableau ci-après propose une représentation synthétique de l'architecture d'ensemble des différents dispositifs.

Recherche			Recherche		
Projets coopératifs laboratoires publics - entreprises privées	All : Agence pour l'innovation industrielle	> 10 M€, principalement en avances remboursables	Projets académiques	ANR : Agence nationale pour la recherche	Subventions d'ampleur variable
	FCE : Fonds de compétitivité des entreprises, dans le cadre des pôles de compétitivité ou des clusters Eurêka	de 1 M€ à 10 M€, en subventions			
Projets individuels d'entreprise < 2000 personnes	Oséo-Anvar	En moyenne 75 k€ en avances remboursables	Projets coopératifs	ANR : Agence nationale pour la recherche RRIT (réseaux de recherche et d'innovation technologique)	Subventions en moyenne de 0,5 à 1 M€





Oséo-Anvar participe à la mobilisation des financements nécessaires à la croissance des PME, notamment à travers le soutien à des projets individuels d'innovation incrémentale.

L'Agence nationale de la recherche (ANR) est notamment chargée de soutenir le développement de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée « amont », ainsi que le partenariat entre le secteur public et le secteur privé et de contribuer au transfert technologique des résultats de la recherche publique vers le monde économique. Elle procède par appels à projets et évaluation par des experts.

Le Fonds de compétitivité des entreprises (FCE), géré par le ministère chargé de l'Industrie, intervient en faveur des projets de R&D structurants s'inscrivant dans le cadre des pôles de compétitivité labellisés en juillet 2005 par le gouvernement et dans les clusters Eurêka. Il est l'outil majeur d'appui aux projets des pôles de compétitivité, à côté des exonérations fiscales et de charges sociales qui ont été par ailleurs prévues.

L'Agence de l'innovation industrielle (All) soutient, en cofinancement avec des entreprises, des grands programmes de R&D industrielle, visant à des débouchés de marché mais nécessitant un important développement de recherche et développement.

Les pôles de compétitivité visent à accroître la compétitivité de l'industrie en mettant en réseau les entreprises, les centres de recherche publics et privés et les organismes de formation autour de projets communs de R&D. Leurs projets de R&D bénéficient surtout du FCE mais sont susceptibles, selon leurs caractéristiques, de recevoir des fonds de différentes sources (Oséo-Anvar, ANR, All, collectivités locales impliquées dans les pôles, exonérations fiscales et sociales).

Le renforcement des liens entre la recherche publique et le monde de l'entreprise

La plupart des projets de R&D soutenus par les pouvoirs publics rassemblent des acteurs de la recherche et des acteurs du monde industriel. Le financement par le FCE des projets des pôles de compétitivité impose ainsi une condition de collaboration entre, au minimum, deux entreprises et un laboratoire public. Deux autres dispositifs particuliers sont emblématiques de cette volonté de faire travailler ensemble ces acteurs :

• **les réseaux de recherche et d'innovation technologiques (RRIT)** ont pour but de favoriser le couplage entre la recherche publique et les entreprises, sur des domaines jugés prioritaires par le gouvernement, notamment dans les secteurs où l'effort conduit par les structures habituelles est jugé insuffisant. Ces réseaux rassemblent des industriels et des équipes issues de la recherche publique autour de projets de R&D sélectionnés suite à un appel à projets. Ces projets sont financés par l'ANR. Parmi ces réseaux, on trouve :

- PREDIT (transports terrestres),
- PAN H (hydrogène et pile à combustible),
- Écotechnologies,
- RNRT (télécommunications),
- RNTL (logiciels),
- RIAM (multimédia)
- Nanosciences et nanotechnologies,
- Matériaux et procédés,
- RIB (biotechnologies),
- RNTS (technologies pour la santé) ;

• **les labels « Instituts Carnot »** : il s'agit d'un nouveau dispositif créé dans le cadre du pacte pour la recherche qui vise à donner plus de visibilité et de ressources aux organismes publics (laboratoires ou instituts) ou parapublics reconnus pour mener efficacement des activités de recherche partenariales, c'est-à-dire effectuées en relation avec les acteurs économiques.

Cette labellisation sera subordonnée à la capacité des candidats à satisfaire une charte reposant sur les critères suivants : compétences technologiques, liens avec la recherche académique, capacité à conduire des projets complexes en respectant des délais d'exécution, et partenariats déjà établis avec le secteur socio-économique. L'abondement financier de l'État sera calculé en fonction du volume et de l'accroissement des contrats conclus avec les partenaires.

La prospective technologique

Les pouvoirs publics utilisent la prospective pour aider à la définition de priorités.

Ainsi, l'ex-Commissariat général du plan, devenu le Centre d'analyse stratégique, mais aussi la Datar, devenu la Diact, ont publié ces dernières années de nombreux rapports prospectifs sur des sujets aussi divers que : « Étudiants et chercheurs à l'horizon 2020 : enjeux de la mobilité internationale et de l'attractivité de la France » (CGP, 2005) ou « La gestion des risques à l'horizon 2020 » (Datar, 2004).

Pour les besoins de la Défense, la Délégation générale pour l'armement (DGA), la Délégation aux affaires stratégiques (DAS) et les états-majors conduisent également des travaux de prospective géostratégique et géopolitique, comportant des dimensions économiques, industrielles et technologiques. Le Plan prospectif à trente ans (PP30) intègre une grande partie de ces réflexions.

De 2003 à 2005, l'Agence nationale de la recherche technique (ANRT) a engagé une réflexion approfondie sur le système français de recherche et d'innovation (SFRI) qu'elle a intitulé « FutuRIS ». Cette opération a réfléchi aux évolutions possibles du SFRI. Les travaux des divers groupes d'experts se sont traduits par des propositions de réformes de ce système¹. L'exercice « Technologies clés », piloté par le ministère chargé de l'Industrie, se veut avant tout un exercice de prospective ciblé sur la technologie. Ce type d'approche se retrouve également dans les « feuilles de route » élaborées par les réseaux de recherche et d'innovation technologique (RRIT), mais de manière plus ciblée.

Ces différents exercices de prospective permettent de nourrir la réflexion des acteurs publics. Dans un monde en profonde mutation, ils sont devenus indispensables.

Technologies clés et les autres études de prospective technologique

Dans le monde actuel, qui se transforme sans cesse et de plus en plus rapidement, la technologie joue un rôle grandissant. La compétitivité des entreprises et le bien-être des individus sont devenus dépendants de la technologie et de l'innovation. Face à la montée des coûts de recherche et développement et aux contraintes en matière de dépenses publiques, aucun gouvernement - même dans les pays les plus riches - n'a les moyens de tout développer dans le domaine de la science et de la technologie. Il est indispensable de faire des choix. La prospective technologique est un « outil » qui doit aider à élaborer et formuler ces choix.

La définition que l'on peut donner de la prospective technologique est la suivante² :

« Effort systématique tendant à examiner l'avenir à long terme de la science et de la techno-

(1) Les documents produits sont disponibles à l'adresse : <http://www.anrt.asso.fr/index.jsp> ; à la rubrique FutuRIS/Questions majeures.

(2) Cette définition est celle donnée dans « Numéro spécial sur les enquêtes gouvernementales sur la prospective technologique », STI Revue, n° 17, OCDE, 1996, p. 19.





logie, de l'économie et de la société en vue de faire ressortir les technologies génériques naissantes de nature à procurer le plus d'avantages économiques et/ou sociaux. »

Depuis le début des années 90, ce besoin d'éclairage sur l'avenir technologique s'est imposé peu à peu aux autorités publiques nationales de nombreux pays à travers le monde. Ainsi, des exercices nationaux de prospective technologique ont été menés par la plupart des grands pays industriels : États-Unis, Japon, Allemagne, Royaume-Uni, Italie, Espagne, etc.

Cette montée en puissance du nombre d'exercices nationaux de prospective technologique s'est accompagnée d'une diversité croissante des caractéristiques de chacun d'entre eux, qui porte à la fois sur les objectifs et sur les méthodes mises en œuvre pour les atteindre.

Il est possible de distinguer deux grandes familles de travaux : celle correspondant à la vision « traditionnelle » de la prospective, qui privilégie les résultats, et celle, d'apparition plus récente, qui met en avant le processus de réflexion et d'analyse. Cette dichotomie entre ces différentes approches a l'avantage de bien mettre en avant l'importance que l'on doit accorder à l'objectif que l'on se donne au moment de définir l'exercice de prospective. En effet, de cet objectif découle une méthodologie et, au final, un résultat. Aussi, chaque famille d'exercices, répondant à une préoccupation différente, ne peut apporter de réponses à des questions qui lui sont étrangères par principe. En ce sens, le résultat est le produit de la méthodologie choisie.

Ces exercices ont généralement pour cadre les frontières nationales. À l'expérience, il apparaît nécessaire d'avoir une approche qui permette d'alimenter une réflexion aux différents niveaux, régional, national et européen.

Les exercices mettant en avant l'élaboration de priorités technologiques

Les premiers exercices de prospective technologique se sont inscrits dans une vision traditionnelle d'aide à la décision. Un certain nombre des exercices de prospective technologique des années 90 (USA 1995 et 1998, France 1995 et 2000, Italie 1996, Pays-Bas 1998, Espagne 2000, Portugal 2000, Chine 2003) ont eu la même approche : il s'agissait d'élaborer des priorités technologiques afin d'aider les décideurs publics, notamment mais pas uniquement, dans le choix des mesures à mettre en œuvre pour favoriser le développement technologique.

La principale méthode utilisée dans ce type d'exercice est celle dite des « technologies clés » (ou des « technologies critiques » pour les Américains). Cette méthode consiste en la sélection de technologies prioritaires, retenues le plus souvent après que des experts ont évalué de longues listes de technologies sur la base de différents critères.

La caractéristique commune de ce premier type d'exercice est, d'une part, d'avoir pour objectif de produire un rapport sélectionnant des technologies, d'autre part, de formuler, plus ou moins explicitement, des recommandations pour l'action publique. Les résultats du travail de réflexion et d'analyse sont privilégiés par rapport au processus lui-même.

Cette famille d'exercices a l'avantage de proposer aux décideurs, publics comme privés d'ailleurs, une représentation du devenir technologique telle que l'imagine un certain nombre d'experts. De cette vision technologique il est possible de tirer des lignes d'actions concrètes.

A contrario, ce type d'exercice s'appuie sur des panels d'experts, restreints par construction, ce qui ne permet pas, à la fois, un large partage du processus prospectif et une véritable légitimité du résultat qui reste celui du groupe d'experts : l'efficacité est privilégiée au détriment de la diversité des points de vue.

L'étude *Technologies clés 2010* s'inscrit dans ce type d'exercice. Elle vise à proposer des possibilités de priorités technologiques aux différentes collectivités publiques françaises.

Les exercices mettant en avant le processus : la recherche d'une vision partagée

Au milieu des années 90, une nouvelle approche de la prospective est apparue : ce qui est important ce n'est plus tant les résultats de l'exercice que l'exercice lui-même. C'est ainsi que certains exercices (Irlande 1998, Australie 1997 et 2001, Nouvelle-Zélande 1998, Allemagne 1998 et 2001, Canada 2003, Royaume-Uni 1995 et 2000 et Suède 2000 et 2002) ont placé au cœur de leurs préoccupations l'élaboration d'une vision commune des futurs technologiques possibles, partagée par le plus grand nombre d'acteurs. L'idée clé de ces exercices est que le processus d'élaboration force l'ensemble des acteurs, parties prenantes de l'exercice, à converger progressivement vers cette vision, favorisant ainsi le passage ultérieur à l'action. Cette approche est souvent présentée sous le vocable de « Foresight », en référence aux exercices initiés au Royaume-Uni (1995, 2000).

Ces exercices se caractérisent par un processus participatif, au cours duquel on cherche à mobiliser non seulement des experts technologues sectoriels mais également les différents types de groupes d'intérêts existants au niveau national, voire régional.

La caractéristique commune à cette seconde famille de travaux est de privilégier la mobilisation des acteurs, voire la création de réseaux, aux fins d'élaboration d'une vision partagée du futur qui peut être ensuite déclinée sectoriellement.

La recherche d'une vision partagée oblige à une mobilisation large, cohérente avec les objectifs d'élaboration. Un tel processus rend moins efficace, voire moins pertinente la production de résultats « facilement » utilisables. Par contre, ce type d'exercice a le mérite d'associer le plus grand nombre à un travail de réflexion sur le devenir technologique. Des échanges peuvent naître des partenariats et des collaborations, de plus, à tous les niveaux, une culture prospective peut se développer et s'entretenir.

« FutuRIS », piloté par l'ANRT, s'inscrit plutôt dans ce type d'approche.



Le cadre géographique d'une prospective technologique

Quel que soit le type d'exercice choisi, dans la quasi-totalité des cas, le territoire concerné par la réflexion prospective est le territoire national. Il est évident que ce cadre d'analyse a sa pertinence et sa légitimité. Toutefois, deux niveaux d'analyse ne manquent pas de s'imposer et s'avèrent essentiels en terme de prospective technologique : le niveau régional et le niveau européen.

L'enjeu régional

L'importance économique et institutionnelle prise par les régions, les réflexions sur la localisation des activités industrielles, sur l'attractivité des territoires font que toute analyse en terme de prospective technologique doit se « décliner » au moins à ce niveau. On peut imaginer deux possibilités pour cette déclinaison :

- chaque région fait sa propre étude de prospective technologique, à partir de ses potentiels scientifiques et technologiques, de son tissu industriel, etc. L'avantage d'une telle démarche est l'appropriation « naturelle » de l'exercice par ceux qui l'ont fait. Le risque est d'avoir une vision prospective régionale s'appuyant essentiellement sur l'état actuel des « forces » de la région, ce qui peut conduire à une vision « conservatrice » et « défensive » de technologies obsolètes à moyen terme ;
- chaque région utilise les résultats d'une étude nationale pour construire sa réflexion prospective, prenant en compte ses forces et ses faiblesses, les synergies possibles avec les régions voisines, etc. L'avantage d'un tel processus réside dans l'existence d'un cadre de référence commun. Le risque, ici, est de ne pas trouver de relais régionaux susceptibles de



s'approprier l'exercice national, soit par une absence de volonté, soit par une sorte de sentiment de défiance vis-à-vis d'un travail venant du niveau central.

Technologies clés 2010 relève, en terme d'utilisation régionale, de la seconde approche. Les technologies identifiées sont, en effet, considérées comme les plus importantes pour le site France.

La dimension régionale suppose que l'on prenne en compte les forces et les faiblesses des potentiels régionaux. Seul un travail spécifique à chaque territoire peut le faire. Les collectivités régionales avec l'appui des DIRE, en collaboration avec les autres services de l'État en région, peuvent utiliser les résultats de cet exercice pour mener une réflexion stratégique sur les atouts et faiblesses, opportunités et menaces des territoires, leur diversification et leurs perspectives de développement.

L'enjeu européen

Si la région est un cadre de réflexion prospective pertinent, le niveau européen l'est tout autant, notamment dans la définition des priorités technologiques des futurs PCRD. En 2005, la Commission a lancé un exercice comparable à *Technologies clés*, appelé *Key Technologies for Europe*. Durant six mois, un groupe d'experts a travaillé sur les technologies clés cruciales pour l'Europe à l'horizon 2015-2020. Les rapports préparés par ces experts ont été présentés et discutés les 19 et 20 septembre 2005³.

À la différence des exercices français, ces rapports ont été rédigés par un expert et ne sont pas le produit d'une réflexion collective de plusieurs experts de domaines différents mais connexes. Ils sont, néanmoins, intéressants en tant que document de réflexion pour qui souhaite poursuivre une analyse de prospective technologique.

Il apparaît qu'une réflexion plus approfondie sur l'identification des priorités technologiques européenne est nécessaire. *Technologies clés 2010* et *Key Technologies for Europe* sont des éléments utiles à la réflexion.

Les objectifs de l'étude Technologies clés 2010

Technologies clés 2010 vise à être un « outil » d'aide à la réflexion pour les autorités publiques, principalement les acteurs territoriaux du développement économique et les relais d'accompagnement. Il s'agit de donner des repères et des clés d'arbitrage permettant, notamment, une optimisation des investissements publics.

L'étude a cherché à répondre à deux questions essentielles :

- quelles sont les technologies qui assureront un avantage de compétitivité et d'attractivité à la France dans le monde à l'horizon 2010-2015 ?
- quelles orientations technologiques doivent prendre les acteurs publics pour répondre à ces impératifs ?

(3) Les rapports sont disponibles à l'adresse suivante : http://www.cordis.lu/foresight/kte_expert_group_2005.htm

Méthodologie

La réalisation de l'étude

La démarche prospective mise en œuvre tout au long de l'étude Technologies clés 2010 s'est attachée à intégrer les enjeux socio-économiques dans une finalité technologique. Elle a visé à identifier les technologies ayant un impact positif sur les activités industrielles et de services réalisées en France.

La conduite de l'étude

Suite à un appel d'offres de la direction générale des Entreprises (DGE), la réalisation de l'étude a été confiée à un consortium de cinq sociétés conduit par le cabinet de conseil en innovation Erdyn. Le consortium était constitué des sociétés Futuribles, Cybion, Virtuoz et Biotics. L'équipe projet était placée sous la direction de Patrick Haouat, PDG d'Erdyn.

L'étude a été orientée et pilotée par un comité (composition en annexe) présidé par André Lebeau, ancien président du CNES et de Météo France. Philippe Bourgeois, du bureau des politiques d'innovation et de la technologie de la DGE, a apporté soutien et appui tout au long de l'étude.

Plus d'une centaine d'experts de l'industrie (dont des PME), de la recherche publique et des relais locaux d'accompagnement ont été, par ailleurs, mobilisés pour apporter une contribution à la réflexion prospective.

Le déroulement de l'étude

L'étude s'est déroulée sur douze mois, en trois phases, à partir de novembre 2004.

Phase 1 : préparation et grandes orientations (trois mois)

Cette première phase a permis de délimiter finement le cadre de l'étude, de concevoir et développer les outils et les méthodes mis en œuvre par la suite. Durant cette phase, les actions suivantes ont été conduites :

- une série d'entretiens avec les responsables sectoriels de la DGE a permis de construire un premier panorama de l'industrie française, tous secteurs d'activité confondus, et d'identifier les enjeux et les thématiques prioritaires ;
- les informations recueillies lors de ces entretiens ont été complétées grâce à un travail d'analyse documentaire. Les documents recueillis ont été indexés et archivés sur le site Internet dédié à l'étude. On trouvera en annexe une sélection des références bibliographiques les plus utiles ;
- en complément de cette approche technico-économique, les grands enjeux socio-économiques - à l'échelle mondiale, européenne et française - ont été analysés. Le document de synthèse correspondant est intégré dans le présent rapport ;
- basé sur des sollicitations directes (méls, courriers) et une opération de communication

dans la presse, un large appel à candidatures a été lancé, afin de « recruter » la centaine d'experts amenés à contribuer à l'étude. Ces experts ont été répartis dans huit groupes de travail ;

- le site Internet de l'étude a été mis en ligne à l'adresse www.tc-2010.fr. Doté d'une partie privée et d'une partie publique, le site a permis à chacun (même hors de la liste des experts) de proposer des technologies susceptibles d'être clés.

Durant cette phase, les travaux de l'équipe projet ont été suivis et validés par un groupe de travail spécifique, dit « groupe méthode ».

Phase 2 : travaux de groupes d'experts (cinq mois)

L'animation de groupes d'experts a été au cœur de l'étude. Un découpage, orienté besoins et applications plutôt que technologies, a été retenu pour huit groupes au total qui se sont réunis chacun quatre fois.

1 - Services de base : production et distribution énergétiques, fourniture et traitement de l'eau, recyclage, construction et services immobiliers, équipements domestiques, meubles ;

2 - Besoins quotidiens : agriculture, industrie agroalimentaire, pharmacie, produits de toilette et détergents, textile et habillement ;

3 - Se déplacer : équipements de transport, services de transport, services à l'automobile, hôtellerie-restauration et agences de voyage ;

4 - Communiquer : équipements informatiques et de bureau, équipements de radio, télévision et communication, médias et services de communication et d'information, publicité et marketing, édition ;

5 - Semi-produits : exploitation minière hors énergie, matériaux de base (métal, papier, bois et minéraux), plastiques et chimie (hors pharmacie), métaux et produits métalliques ;

6 - Équipements, process et méthodes de production : instrumentation, machines et équipements industriels, machines et équipements électriques, méthodes d'amélioration de la productivité ;

7 - Fonctions support : banque-assurance, R&D et conseil, activités d'ingénierie et d'architecture, services de sécurité, services de recrutement et de travail temporaire, services légaux, de comptabilité et de management, commerce de gros et de détail, services divers ;

8 - Outil d'aide à la réflexion : groupe transversal aux activités économiques et aux technologies, constitué d'acteurs régionaux et consulaires du développement économique.

Les sept premiers groupes ont débattu de « monographies sectorielles » rédigées par Futuribles. Ces documents ont été progressivement enrichis des contributions des experts.

Les points suivants ont été traités lors des réunions des groupes :

- Réunion 1 : des enjeux aux activités économiques
 - présentation de la démarche générale de l'étude ;
 - cadrage socio-économique : débat, appropriation par le groupe ;
 - présentation des monographies sectorielles : débat.
- Réunion 2 : des activités clés aux besoins en technologies
 - activités clés pour la France et ses régions : quels critères permettent de qualifier une activité de « clé » ?
 - identification des technologies qui sous-tendent ces activités ;
 - élaboration d'une première liste de technologies « candidates ».
- Réunion 3 : des technologies candidates aux technologies clés
 - technologies candidates : ajustement de la première liste ;
 - élaboration des critères pour qualifier une technologie de « clé » ;
 - élaboration d'une première liste de technologies clés.
- Réunion 4 : technologies clés et régions
 - affinage de la première liste de technologies clés ;

- hiérarchisation des technologies clés, verrous, freins ;
- intégration de la dimension territoriale.

Phase 3 : rédaction et validation du livrable - finalisation de l'étude (quatre mois)

À l'issue des réunions des groupes d'experts, les listes des technologies clés proposées par chacun des sept groupes ont fait l'objet d'une mise en cohérence par l'équipe projet. C'est ainsi que 83 technologies clés ont été retenues, et les fiches correspondantes ont été renseignées, puis soumises aux spécialistes sectoriels de la direction générale des Entreprises (DGE) et de la direction générale de l'Énergie et des Matières premières (DGEMP), ainsi qu'aux membres du comité de pilotage, pour validation.

Des versions synthétiques des monographies sectorielles ont également été rédigées pour être intégrées au présent rapport.

La concertation avec les acteurs du développement technologique s'est poursuivie pendant cette dernière phase :

- une réunion plénière, rassemblant l'ensemble des experts, a eu lieu au ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie ;
- quatre rencontres ont été organisées en région (Rhône-Alpes, Nord - Pas-de-Calais, Centre, Alsace).

Le cadre géographique et temporel de l'étude

Pour rester en cohérence avec les études précédentes, **l'horizon temporel** a été fixé à 2010. C'est un horizon très proche pour un exercice de prospective, et les résultats de l'étude s'en ressentent, même si le long terme n'a pas été négligé. En effet :

- les technologies identifiées comme clés correspondent à des applications susceptibles d'être mises sur le marché à l'horizon 2010-2015 ;
- le cadre d'analyse a souvent dépassé cet horizon pour observer des tendances plus structurelles pouvant être largement postérieures à 2020.

Le champ géographique de l'étude comportait quant à lui une triple dimension :

- l'analyse a pris en compte la dimension internationale, et notamment européenne, ce qui a permis d'intégrer des critères de positionnement, de mobilité et de localisation d'activités. Les possibilités de coopération avec d'autres pays européens ont également été identifiées ;
- l'objectif visé revêt une envergure nationale. Le cadre de réalisation des orientations mises en avant dans l'étude est l'espace national qui est le cadre de référence dans lequel s'inscrivent les technologies clés identifiées ;
- les régions ont été intégrées à l'analyse, en tant qu'acteurs du développement économique et futurs utilisateurs de l'étude. La dimension territoriale apparaît également à travers les pôles de compétitivité qui sont identifiés dans chaque fiche.

La caractérisation des technologies clés

La grille d'analyse de chaque technologie clé

Une technologie (ou un ensemble de technologies) a été considérée comme clé dès lors qu'elle permet d'agir structurellement sur la compétitivité et l'attractivité des activités en France. Le niveau de « granularité » auquel est descendu l'étude n'était pas précisé a priori. Le « poids » de chacune des technologies clés, en termes d'importance des marchés d'applications, est in fine relativement hétérogène : certaines technologies du domaine des matériaux représentent plusieurs points de PIB, alors que d'autres, plus spécifiques, « pèsent »

beaucoup moins, mais recèlent un fort potentiel de croissance et répondent à des enjeux sociétaux majeurs.

Les technologies finalement retenues comme clés sont donc aussi bien des technologies existantes présentant un fort potentiel d'évolution et d'impact que des technologies émergentes pouvant être introduites et déployées dans l'industrie dans les dix prochaines années. Chaque technologie clé est décrite dans une fiche dont les champs sont les suivants :

- **l'intitulé** synthétique de la technologie ;
- **la description** de la technologie, qui énonce les grands principes sur lesquels elle repose, donne des exemples de « briques technologiques » qui la composent, identifie les verrous éventuels, et précise le niveau de maturité de la technologie ;
- une zone de **commentaires**.

Chaque fiche renseigne également les critères suivants qui constituent la grille d'analyse des technologies :

Enjeux, Impact : il s'agit de préciser en quoi la technologie considérée permet de répondre à un certain nombre d'enjeux et quel est son impact prévisible :

- développement durable : modération de la ponction sur les ressources naturelles, réduction des rejets de gaz à effet de serre, polluants, déchets... ;
- enjeux sociaux : création ou maintien d'emplois, vieillissement de la population (accessibilité...) ;
- enjeux réglementaires ou normatifs : respect des directives européennes, établissement de standards alignés sur la technologie ;
- impact positif sur l'attractivité des territoires : les technologies appliquées aux infrastructures (transports, communications...) sont susceptibles d'être les plus concernées par ce critère ;
- impact sur la compétitivité du tissu des entreprises : conquête de nouvelles parts de marché, réduction des coûts, potentiel de diffusion dans les PME, réduction du « time to market »... ;
- autres impacts ;
- horizon temporel prévisible de l'impact.

Marché : il s'agit de préciser à quoi servira la technologie considérée :

- quelles sont les applications, les usages (intermédiaire, final) de la technologie considérée ;
- comment se caractérise(nt) le (ou les) marché(s) visé(s) (taille, dynamique, potentiel export pour les entreprises françaises) ? Pour ce critère, les limites de l'étude sont claires : il s'agit de donner (lorsque l'information est disponible) des repères qualitatifs ou quantitatifs, et non pas de décrire avec précision le champ concurrentiel pour chaque technologie.

Acteurs : il s'agit de caractériser « l'écosystème » dans lequel la technologie considérée pourra se développer :

- quelles disciplines scientifiques sous-tendent la technologie ?
- quelles compétences technologiques sont nécessaires ?
- quels pôles de compétitivité sont actifs sur la technologie ?
- avec quelles autres technologies clés la technologie considérée interagit-elle ?
- qui sont les principaux acteurs français et étrangers actifs sur la technologie : entreprises, laboratoires publics... ?

Les divers niveaux d'utilisation du document

Une première utilisation de l'étude permet une simple « navigation » à partir d'une information de départ choisie par l'utilisateur. Ainsi, à titre d'illustration, à partir des informations contenues dans les fiches descriptives :

- un laboratoire de recherche, sur la base d'une ou plusieurs disciplines scientifiques qui font

son excellence, peut accéder aux technologies clés liées, mais aussi aux pôles de compétitivité et aux acteurs industriels concernés ;

– une PME, ou un réseau de PME, positionnée sur un marché, donc sur un domaine d'application, identifiera les technologies clés qui impactent ce marché et les acteurs clés associés (industriels donneurs d'ordres, laboratoires).

Les régions, mais aussi les entreprises aux activités multiples gérées en « portefeuilles stratégiques », peuvent envisager une utilisation plus « avancée » de l'outil.

L'alignement du référentiel des 83 technologies clés sur des nomenclatures déjà utilisées par des organismes tels que l'Observatoire des sciences et des techniques (OST) apporte toute sa valeur à ce type d'utilisation. Ces nomenclatures, en termes de compétences scientifiques, de compétences technologiques, de secteurs d'activité, permettent des analyses variées dont on trouvera des exemples dans l'ouvrage *Régions et technologies clés : quelles stratégies* ⁴.

À partir de ce type d'analyse, il est possible de définir et de mesurer la proximité d'une région avec une ou plusieurs technologies clés. Cet indicateur de proximité est un indicateur « composite » :

- une région sera d'autant plus « proche » d'une technologie clé qu'elle sera active ou spécialisée sur des disciplines scientifiques ou des compétences technologiques qui sous-tendent cette technologie clé ;
- cette proximité sera renforcée par la présence sur le territoire régional d'acteurs majeurs (entreprises, laboratoires) ou de pôles de compétitivité actifs dans une technologie clé.

En complément d'une analyse stratégique, qui peut se baser sur des méthodes de type AFOM (Atouts - Faiblesses - Opportunités - Menaces), cet indicateur de proximité propose des axes de réflexion.

Une application typique de ce type d'analyse est la nécessité, pour une région, de se positionner sur des technologies clés dont elle est proche, en réaction à des menaces qu'elle aura identifiées.

Précaution d'usage

Il est bien évident qu'une utilisation « mécanique » de ce type d'analyse risque de conduire à des erreurs d'interprétation, car la maille proposée pour les disciplines scientifiques ou les compétences technologiques est relativement grande. Plus adaptée à une étude au niveau national, cette maille doit être plus finement segmentée au niveau d'une région. Cet outil donne des repères et permet d'initier la réflexion. Il reste un outil et, en aucun cas, il ne se substitue à une analyse fine.

(4) Ce document est disponible à l'adresse suivante : <http://www.industrie.gouv.fr/biblioth/docu/regettech.htm>

Contexte

Afin d'éclairer le contexte, il convient de cerner les enjeux, tant mondiaux qu'europeens et français, auxquels les innovations technologiques pourraient répondre ou contribuer à leur résolution, et ainsi trouver leur marché. Certes le sujet est vaste, mais en considérant que certains enjeux (réduction de la pauvreté, démocratie...) dépendent davantage de choix politiques (même si la technologie peut aussi contribuer à ces objectifs), nous avons choisi de restreindre le champ d'investigation aux sujets sur lesquels l'innovation technologique a un impact direct. Les enjeux suivants ont été identifiés et sont développés ci-après :

- au niveau mondial :
 - les problèmes de sécurité liés au contexte géopolitique ;
 - le changement climatique ;
 - la ressource en eau ;
 - les défis énergétiques (production et maîtrise de la consommation) ;
 - la disponibilité des matières premières ;
- au niveau européen et français :
 - le vieillissement démographique ;
 - l'emploi ;
 - la compétitivité économique.

Au niveau mondial

Le contexte géopolitique et la sécurité

Un monde de plus en plus instable

La disparition de l'Empire soviétique a entraîné toute une série de bouleversements majeurs dans l'appréhension des conditions de la sécurité internationale. Le monde est apparu comme potentiellement plus sûr, marqué par une moindre prégnance des confrontations internationales. Tout un discours s'est développé sur le « nouvel ordre mondial », la « fin de l'Histoire », et les budgets militaires des pays développés ont été réduits de manière drastique : les dépenses militaires mondiales ont ainsi baissé de près de 30 % entre 1990 et 2000. La baisse des budgets de défense fut en fin de période particulièrement forte dans les pays européens, ce qui ne fit qu'accroître la puissance militaire relative des États-Unis. Aujourd'hui, du point de vue militaire, les États-Unis sont la seule superpuissance mondiale.

Malgré cette puissance de coercition, le monde de 2005 ne paraît pas plus sûr et stable que celui d'avant la fin de la guerre froide, bien au contraire. Une étude du PIOOM (*Interdisciplinary Research Program on Causes of Human Rights Violation*) indique que, depuis 20 ans, le nombre de guerres internationales, comme l'invasion du Koweït par l'Irak en 1990, a diminué

au profit de conflits internes à des pays (génocide au Rwanda, les guerres yougoslaves, la Côte d'Ivoire, la Somalie, la Colombie, le Nigeria...). Si l'on compare les conflits en fonction du nombre de victimes par an, on constate que si le nombre de conflits de haute intensité (plus de 1 000 morts par an) a peu évolué de 1995 à 2000, celui des conflits politiques violents (moins de 100 morts par an) a augmenté de façon vertigineuse (de 40 à 178).

La pérennisation de l'asymétrie des conflits

Les États occidentaux ont accès à des moyens et des technologies leur assurant une supériorité militaire à peu près certaine. Face à cette réalité, les entités non étatiques ou les États hostiles ne peuvent qu'adopter des stratégies de contournement de la puissance. Pour ces « groupes armés non étatiques », qui sont aussi bien des milices, des guérillas plus ou moins dégénérantes, des démembrements de fonction régaliennne (du type de certains groupes d'autodéfense algériens ou colombiens), des groupes criminels transnationaux, des groupes terroristes ou même des sociétés privées de sécurité, des moyens forts sommaires, voire archaïques sont tout à fait à même de constituer des armes de destruction massive et de mettre en danger des armées occidentales modernes. Face à ce risque, la puissance militaire ne sait pas forcément qui et quoi frapper, comme l'ont déjà montré les ripostes américaines aux attentats contre les ambassades américaines au Kenya et en Tanzanie en 1998 ou la guerre contre Al Qaïda depuis.

On peut s'attendre à l'avenir à une poursuite d'une stratégie d'opposition de moyens archaïques aux très hautes technologies. Les menaces dites « NRBC », c'est-à-dire nucléaire, radiologique, bactériologique ou chimique, si elles sont considérées aujourd'hui comme encore très improbables, constituent des menaces d'événements à si fort impact que la maîtrise des technologies permettant de les contrer préventivement ou d'en atténuer les conséquences est un enjeu fort pour les sociétés potentiellement visées.

L'importance des technologies duales de sécurité

La défense a perdu son « cœur territorial » : ainsi, on ne défend plus la France à ses frontières. Cette tendance est renforcée en France par la construction européenne, qui affecte la définition de la notion de frontière (espace Schengen). Cette « dé-territorialisation » de la fonction de défense a deux conséquences :

- la défense et la sécurité intérieure se rapprochent ;
- les capacités de contrôle deviennent l'élément central de la puissance : l'essentiel est d'assurer la capacité de contrôle des flux (d'information, financiers, humains...). L'heure est donc au développement de senseurs, de moyens électroniques et informationnels de contrôle, en particulier des populations et des voyageurs, comme les moyens de biométrie.

On assiste également à un retour en grâce de la très ancienne mission de surveillance de ce que les militaires appellent les « approches » du territoire : l'espace aérien, les côtes, les zones de transit (ports et aéroports). De ce point de vue aussi, les technologies de capteurs et d'identification seront maîtresses. Dans un tel contexte, la maîtrise de technologies duales est un enjeu majeur. Le lien entre recherche militaire et innovation civile a toujours été l'objet de débats. Or, à l'ère des retombées du militaire sur le civil a succédé une période où le mouvement semblait avoir définitivement changé de sens, en raison des progrès fulgurants du secteur civil dans les technologies de l'information et de la communication. Mais aujourd'hui, l'heure est à l'intégration, comme l'illustre bien le cas des industries spatiales : militaire et civil sont liés, à la fois dans la recherche, dans la production et dans l'usage des technologies, la notion de sécurité dépassant le cadre de la défense traditionnelle. Il y a danger actuellement si rien n'est fait en France ou en Europe à voir les États-Unis imposer les standards et les outils qu'ils mettent au point au travers de leurs programmes *Homeland Security*.

Dans un environnement international marqué par la peur du terrorisme, les exigences de sécurité (dans un sens de plus en plus large) des infrastructures et des lieux publics vont devenir une part importante des spécifications et des cahiers des charges. L'impact économique direct d'une situation mondiale incertaine du point de vue de l'occurrence d'un événement terroriste de grande ampleur (la menace et la peur valant à cet égard pratiquement autant que la réalisation du risque) toucherait en priorité trois domaines : l'assurance, le risque terroriste étant difficilement assurable, les transports par un contrôle accru des marchandises comme des passagers, les dépenses privées de sécurité, déjà évaluées à 40 Md\$ US par an aux États-Unis en 1999 (selon certains, le marché mondial de la protection contre le terrorisme serait de 100 Md€).

L'impact n'est pas seulement économique car, pour que de nouvelles technologies permettant de préserver la sécurité (des données informatiques, des sites, des personnes...) soient acceptées par le marché, le challenge sera aussi qu'elles préservent en même temps l'espace privé pour éviter un syndrome de type *big brother*.

Les enjeux du changement climatique

L'effet de serre est nécessaire à l'équilibre climatique de la Terre et au maintien d'une température propice à la vie. Cependant, au début des années 1970, on a observé une augmentation notable de la concentration de certains gaz à effet de serre dans l'atmosphère et les prémices d'un réchauffement global. La réalité et l'origine, pour partie humaine, du phénomène ne font pratiquement plus débat, y compris parmi les détracteurs du protocole de Kyoto.

Les risques liés à l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre et l'élévation de la température terrestre

Tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, mis en avant par le groupe international d'experts sur le changement climatique (GIEC), prévoient une augmentation des concentrations de dioxyde de carbone, et une élévation de la température moyenne mondiale à la surface de la terre et une hausse du niveau de la mer au cours du XXI^e siècle. En 2004, l'Agence européenne de l'environnement (AEE) estimait qu'en Europe ces tendances se sont traduites par une augmentation moyenne des températures de 0,95°C depuis 1900, soit un réchauffement plus marqué que la moyenne mondiale. Si aucune mesure n'est prise, d'ici à 2100, l'AEE prévoit un réchauffement compris entre 2°C et 6,3°C. Quant au régime des pluies, il est de plus en plus contrasté entre le nord et le sud de l'Europe : dans le Sud, si, comme c'est probable, la tendance (- 1 % de précipitations tous les dix ans) se prolonge, l'impact pourrait être important sur l'agriculture et les ressources en eau.

Un certain nombre de phénomènes régulateurs du climat échappent encore à la compréhension des scientifiques. Aussi de nombreuses incertitudes pèsent sur les tendances lourdes identifiées ci-dessus au niveau de la quantification des phénomènes et/ou de leur échelle temporelle.

« Les changements climatiques prévus auront des effets bénéfiques et néfastes sur les systèmes environnementaux et socio-économiques, mais plus les changements et leur rythme seront grands, plus les effets néfastes prédomineront » indique le GIEC. Les risques sont inégalement répartis car les phénomènes climatiques ne se manifestent pas de manière uniforme ; d'autre part, l'impact économique et humain du changement climatique varie largement en fonction du niveau de développement et des ressources mobilisables pour l'adaptation. La hausse des températures pourrait favoriser le développement des maladies infectieuses, leur expansion vers les zones tempérées, et des épidémies mondiales. Par ailleurs, à l'horizon 2020, les vagues de chaleur estivale ou les événements climatiques extrêmes constituent un risque plus prégnant.

Les problèmes d'accès à l'eau potable sont également appelés à s'accroître d'ici à 2020. Le changement climatique peut amplifier le phénomène dans des régions comme l'Asie centrale, le Moyen-Orient, le pourtour méditerranéen et l'Australie. Dans les régions côtières, une salinisation accrue des estuaires et nappes phréatiques est envisageable. L'agriculture est la première activité susceptible d'être bouleversée par le changement climatique (sécheresse, parasites...). Une forte teneur de l'atmosphère en CO₂ favorise les rendements, mais ne compense pas les effets néfastes de la sécheresse.

Au-delà de 3° C de hausse, il y a un risque de baisse de la production, avec des inégalités en fonction des espèces et de la localisation, ce qui entraînerait une hausse des prix des produits alimentaires. Aux latitudes moyennes et élevées, on peut escompter des effets positifs sur l'agriculture en cas de réchauffement modéré. Sous les tropiques, les rendements devraient diminuer, même en cas de réchauffement modéré, car les cultures sont proches du seuil de tolérance thermique et les cultures pluviales prédominent. Cependant, la production agricole ne devrait pas être modifiée dans le cadre d'une augmentation de 2° C. Dans la mesure où on n'anticipe pas un réchauffement supérieur à 1,1° C d'ici à 2020, les approvisionnements ne devraient pas souffrir du changement climatique, en particulier aux latitudes moyennes si la fréquence et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes (sécheresses, pluies violentes) ne sont pas trop importantes.

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES)

La Convention climat (UNFCCC, 1992) et le protocole de Kyoto (1997) visent à réduire les émissions globales. Sachant que les États-Unis (qui représentent le quart des émissions mondiales) et l'Australie ont explicitement rejeté le Protocole, son entrée en vigueur n'a été possible en février 2005 que par la ratification de la Russie. Mais l'objectif de réduction des émissions du protocole de Kyoto est trop faible pour parvenir à stabiliser les émissions et il est limité dans le temps à dix ans. Un nouvel accord plus ambitieux, un « Kyoto II », serait nécessaire pour stabiliser les émissions de CO₂ et ralentir, à long terme, l'effet de serre.

Par ailleurs, si les États de l'Union européenne soutiennent le Protocole, ils ne parviennent généralement pas à remplir leurs engagements. Malgré les efforts et accords dans le sens d'une diminution, les émissions de gaz à effet de serre devraient continuer à croître. Selon le scénario de référence de l'OCDE, entre 1995 et 2020, les émissions du seul CO₂ devraient augmenter de 33 % dans l'OCDE et de près de 100 % dans les autres pays. Les évaluations du GIEC et de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) sont du même ordre de grandeur.

Les émissions de gaz à effet de serre procèdent de l'ensemble des activités humaines. Cependant, dans l'OCDE, le secteur de l'énergie au sens large (transport, production d'électricité, combustion industrielle et domestique) contribue pour environ 80 % aux émissions de gaz à effet de serre directes (CO₂, CH₄, N₂O) et indirectes (SO_x, NO_x, CO). La majeure partie de ces émissions est due à l'utilisation de combustibles fossiles. Les incertitudes relatives aux émissions relèvent donc en grande partie de l'évolution de la demande énergétique et de l'utilisation des combustibles fossiles pour répondre aux besoins énergétiques.

La stabilisation de la teneur de l'atmosphère en CO₂ conduit à limiter le niveau global des émissions à environ 3,5 Gt par an (capacité d'absorption de la biosphère). Le recours aux énergies fossiles ne devrait alors pas dépasser 4 Gtep (actuellement, une Gtep correspond à environ 0,9 Gt de carbone). Sur la base d'un scénario tendanciel de consommation énergétique à 13,5 Gtep, il s'agirait donc de produire 9,5 Gtep d'énergie hors carbone en 2020. Cette énergie pourrait être nucléaire ou renouvelable (1,3 Gtep aujourd'hui) ou encore fossile, mais avec une séquestration du carbone émis. Ce challenge semble irréaliste en vingt ans, c'est pourquoi l'objectif de stabilisation de la teneur en CO₂ ne semble atteignable, selon la plupart des études, qu'à un horizon de 50 ans (il implique une division par deux des émissions à l'échelle

du monde, soit une division par quatre des émissions des pays de l'OCDE pour permettre aux pays émergents de se développer). Il n'en reste pas moins que pour atteindre cet objectif, il est nécessaire d'inverser la tendance à la hausse des émissions avant 2020.

Les voies de réponses au changement climatique

Trois voies de réponses existent aux enjeux du changement climatique :

- la première consiste à le prévenir en limitant les émissions de gaz à effet de serre ce qui revient, pour l'essentiel, à utiliser des sources énergétiques plus pauvres en carbone et à maîtriser les besoins énergétiques ;
- la seconde consiste à capturer et stocker les émissions de gaz à effet de serre (stockage du CO₂) ;
- la troisième serait de prévenir les conséquences engendrées par le changement climatique :
 - prévention des risques liés à des inondations (glissements de terrains, pollutions de cours d'eau, revêtements routiers poreux permettant une meilleure évacuation de l'eau...) ;
 - risques liés à des périodes de fortes chaleurs estivales (technologies permettant d'économiser l'eau, climatisation par réversibilité du solaire thermique...) ;
 - risques liés à des tempêtes violentes (modes de construction plus résistants aux intempéries...) ;
 - risques liés au développement de maladies infectieuses comme le paludisme ou la dengue par des traitements médicaux appropriés.

Les ressources en eau douce seront-elles suffisantes ?

Une consommation croissante et inégalement répartie

Deux facteurs entrent en ligne de compte : la croissance démographique et l'augmentation de la consommation d'eau par habitant. Les prélèvements croissent deux fois plus vite que la population :

- depuis 50 ans, les prélèvements d'eau à l'échelle mondiale ont quadruplé. Selon l'OCDE, ils devraient s'accroître, d'ici à 2020, de 10 % dans les États membres de l'Union européenne, et de 30 % à l'échelle mondiale. Cependant, sachant qu'ils ne prennent pas en compte une possible augmentation de la consommation moyenne par habitant dans les pays en voie de développement (PVD), ces chiffres pourraient sous-évaluer la demande à venir ;
- en dépit de très fortes variations, les habitants des pays développés consomment davantage d'eau que ceux des PVD. Cependant, leur consommation a globalement diminué de 11 % depuis 1980. Cette tendance est encourageante car elle traduit un découplage de la croissance et de la consommation d'eau ;
- au niveau mondial, l'agriculture est le premier consommateur (70 % des prélèvements) et devrait le rester du fait de l'accroissement des surfaces irriguées.

Dans les pays de l'OCDE, les prélèvements industriels et ménagers diminuent (hausse des prix de l'eau, gains d'efficacité, délocalisations de certaines industries grandes consommatrices). Selon l'OCDE, c'est surtout la demande industrielle et énergétique des pays émergents, qui devrait accroître le plus les besoins en eau dans les vingt prochaines années.

Une dégradation de la qualité de l'eau

L'agriculture est le secteur le plus polluant. Le ruissellement entraîne une pollution diffuse par les engrais et les pesticides. En Europe et en Amérique du Nord, les concentrations en nitrates dépassent très souvent les taux recommandés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Dans l'OCDE, ce problème devrait s'aggraver d'ici à 2020 compte tenu de la durée de vie de ces composés chimiques. L'industrie émet les polluants les plus dangereux (métaux

lourds, polluants organiques persistants) et les plus multiformes (liquides, atmosphériques, solides). Elle pourrait voir son impact multiplié par quatre d'ici à 2025 à l'échelle mondiale. Enfin, les ménages non raccordés à un réseau d'épuration contribuent à la pollution chimique et organique.

Les polluants ont des effets différés (accumulation dans les sédiments) et sur une longue durée. Il est particulièrement difficile de protéger les eaux souterraines des pollutions diffuses et encore plus de les dépolluer (faible débit, coût élevé). Selon l'OCDE, compte tenu de leur importance pour l'approvisionnement en eau potable, les coûts de traitement des nappes phréatiques devraient peser de plus en plus lourd dans l'économie de nombreux pays. Les effets sanitaires actuels de l'eau polluée sont les intoxications chimiques et les maladies infectieuses ou parasitaires qui seraient responsables de cinq millions de morts par an.

Les effets environnementaux et économiques

Les effets environnementaux et économiques sur les ressources en eau s'expriment à travers deux éléments :

- **l'eutrophisation** : la surabondance de nutriments (phosphore, azote) provenant des engrais conduit à la prolifération de micro-algues qui fait que l'oxygène n'est plus suffisant pour permettre le développement d'autres organismes. Les eaux deviennent stériles et inexploitable pour la pêche. Ce phénomène concerne, déjà aujourd'hui, plusieurs zones en Méditerranée et dans le golfe du Mexique ;

- **la salinisation** : dans le cas de l'irrigation, la surconcentration en sels minéraux des terres agricoles est néfaste aux cultures. Déjà 10 % des surfaces irriguées sont endommagées, dont le tiers en Inde.

Des risques de pénuries

Au cours des 50 dernières années, la croissance démographique et la contamination des eaux ont conduit à diviser par plus de deux la quantité d'eau disponible par habitant. Cette tendance devrait se maintenir. Aujourd'hui, dix-sept pays consomment plus d'eau qu'ils n'en reçoivent. La surexploitation des nappes phréatiques, qui représentent 90 % des ressources mondiales en eau douce directement utilisables, fait qu'elles se rechargent très lentement (0,1 à 0,3 % par an), ce qui pose problème. Les zones de stress⁵ ou de pénurie hydrique sont fonction des conditions géographiques et des niveaux de croissance démographique et/ou économique. Seront particulièrement concernés l'Afrique (Maghreb, Afrique australe), le Moyen-Orient et l'Asie, y compris l'Inde et la Chine. Sur la base des projections démographiques moyennes de l'ONU, on estime à 2,8 milliards le nombre d'individus qui souffriront de stress ou de pénurie hydrique en 2025.

Les enjeux technologiques liés à la ressource en eau

Les enjeux technologiques liés à la ressource en eau permettent soit une plus grande économie d'eau pour les besoins humains (agriculture), soit de préserver la qualité de l'eau par la réduction des sources de pollution, soit un accroissement des ressources. Dans l'agriculture, on peut ainsi envisager des plantes hybrides ou OGM résistant mieux aux sécheresses ou supportant un arrosage à l'eau saumâtre. Cette dernière option pose cependant problème car elle risque d'accélérer la salinisation des sols. Des techniques d'irrigation plus efficaces existent déjà (goutte-à-goutte), mais leur coût demeure élevé ce qui représente, en soi, un enjeu aussi. La limitation de l'usage d'engrais ou de pesticides dans l'agriculture par des technolo-

(5) Une région est dite sous le coup d'un stress hydrique lorsque les ressources annuelles, c'est-à-dire la quantité d'eau disponible pour tous les usages qu'ils soient humains (industrie, agriculture, consommation individuelle, ...) ou naturels (écosystèmes, plantes et animaux sauvages), sont inférieures à 1 700 m³ annuels par personne ; et d'une pénurie en deçà de 1 000 m³ par personne.

gies d'épandage ou de pulvérisation précis et économes et, mieux encore, la mise au point d'engrais ou pesticides « naturels » n'affectant pas la qualité de l'eau doivent être recherchées. Des technologies permettant de remettre à neuf ou de refaire une étanchéité des fosses septiques anciennes (pollution de sources en France) méritent une attention toute particulière.

Dans l'industrie, l'effort déjà réalisé en matière de rendement de l'eau utilisée devrait se perpétuer. L'incertitude pèse surtout sur l'extension des techniques économes aux pays en cours d'industrialisation. Au niveau des infrastructures, d'importants investissements seraient nécessaires pour limiter les fuites sur les réseaux de distribution et d'irrigation, ce qui peut être un enjeu en termes de matériaux ou de conception du réseau.

L'amélioration des techniques de traitement et de purification des eaux doit être poursuivie. Toutefois, aujourd'hui, le plus souvent une extension de la protection des bassins versants, c'est-à-dire des territoires qui reçoivent les eaux alimentant une nappe souterraine, un lac, une rivière..., est envisagée. Elle peut prendre la forme de réserves naturelles ou de rachat des terres, afin d'éviter que n'y soient utilisés des polluants agricoles ou industriels. Moins coûteuse à long terme (et parfois à court terme) que le retraitement de l'eau et recommandée par le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), elle est utilisée par la ville de New York et certaines agglomérations françaises.

Pour accroître les volumes disponibles, les technologies de dessalement de l'eau de mer sont une voie possible. Même si son coût est trois à quatre fois plus élevé que celui du traitement d'une eau brute, il a diminué de moitié en dix ans et devrait encore être divisé par deux dans la prochaine décennie. Cependant, pour beaucoup de pays, il n'est guère envisageable à grande échelle compte tenu de son coût prohibitif en énergie. Les technologies de dessalement de l'eau de mer à faible consommation énergétique et à faible coût sont clairement un enjeu aussi pour les régions dont le niveau de stress hydrique est déjà aujourd'hui trop important (Moyen-Orient, Maghreb...).

Vers de futurs chocs énergétiques ?

Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 ont révélé la vulnérabilité d'une économie dépendante d'une matière première, qui plus est géographiquement concentrée. L'approvisionnement en matières premières, tant énergétiques que minérales et minières, apparaît comme un problème d'autant plus crucial que les systèmes économiques et modes de vie industriels reposent sur une consommation d'énergie croissante et que les pays émergents s'affirment comme de nouveaux pôles durables de consommation de matières premières, énergétiques et minières. En dépit de la diversité des sources primaires d'énergie, les combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) représentent 80 % de la demande énergétique mondiale. On s'y attachera donc particulièrement.

L'accroissement de la demande énergétique

Une augmentation de la demande énergétique mondiale paraît inévitable à un horizon de vingt ans, compte tenu de l'accroissement démographique, de l'industrialisation des pays en développement, de l'inertie des systèmes de production. Son niveau exact pose cependant question. Si les tendances de croissance actuellement observées se pérennisent, en particulier celles de la Chine, c'est la consommation des pays en développement qui pourrait augmenter le plus rapidement. Il convient néanmoins de garder à l'esprit que ces prévisions sont surtout des projections des tendances présentes, qui n'établissent pas de scénarios différenciés de consommation en fonction d'hypothèses alternatives (moindre ou plus forte croissance économique, mesures d'économies d'énergies...).

La polarisation sectorielle de la demande énergétique

L'électricité et les transports sont les deux moteurs de la croissance de la consommation énergétique. Selon l'Agence internationale de l'énergie, entre 2000 et 2030, la croissance annuelle de leur demande respective devrait atteindre 2,4 % et 2,1 %. Néanmoins, les mêmes restrictions s'appliquent à ces prévisions, essentiellement fondées sur une transposition linéaire des tendances actuelles. Dans les pays de l'OCDE, les transports représentent d'ores et déjà plus de 60 % de la demande de pétrole.

Une efficacité énergétique accrue

Malgré une consommation globale et par habitant en augmentation, on observe un certain découplage de la consommation d'énergie et de l'activité économique. Passé un seuil critique de développement, une économie requiert de moins en moins d'énergie par unité supplémentaire de PIB. Dans l'OCDE, l'intensité énergétique (approvisionnements totaux en énergie primaire par unité de PIB) a diminué d'un peu plus de 16 % depuis 1980. La diminution de l'intensité énergétique s'est ralentie après 1985 à cause de la baisse des prix du pétrole.

La répartition inégale de la consommation énergétique à l'échelle mondiale

Aujourd'hui, un quart de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité. Dans les pays en développement, la biomasse (bois, résidus agricoles, déjections animales) représente plus de la moitié de la consommation énergétique domestique : 2,4 milliards de personnes en dépendent pour se chauffer et cuisiner. Mais la part des pays de l'OCDE dans la consommation énergétique mondiale recule régulièrement du fait de l'accroissement de la demande des pays en développement en raison de leur industrialisation et d'un taux de croissance démographique élevé. Selon l'OCDE, la demande de la Chine pourrait augmenter de 3 % par an environ (2 % en Asie de l'Est).

30

La prépondérance des énergies fossiles et la dépendance énergétique

Aujourd'hui, la consommation énergétique mondiale est de 10 Gtep dont 8 Gtep de combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon). Durant les trente dernières années, dans l'OCDE, le gaz et le nucléaire ont progressivement remplacé le charbon et le pétrole pour la production électrique. Le pétrole est surtout consacré aux transports. La dépendance économique vis-à-vis des énergies fossiles devrait se maintenir et probablement s'accroître, essentiellement à l'égard du Moyen-Orient, qui détient 65 % des réserves prouvées. Selon l'OCDE, cette région devrait assurer plus de 74 % des approvisionnements mondiaux en pétrole brut en 2020 (54 % en 1997). L'Europe, comme les autres pays de l'OCDE, devra également faire face à une dépendance accrue pour ses besoins en gaz et en pétrole.

La dépendance de l'économie mondiale vis-à-vis des combustibles fossiles, et donc vis-à-vis d'un nombre relativement restreint de pays producteurs, fait de la stabilité politique de ces pays un enjeu économique majeur. D'autant que les sites de production et les infrastructures (oléoducs, gazoducs...) constituent des cibles privilégiées pour des groupes aux effectifs et moyens réduits, qu'ils soient terroristes ou séparatistes (Nigeria, Soudan). Les restrictions volontaires de production constituent également une arme politique pour ces pays sur la scène internationale. Si toutes les prévisions s'accordaient ces dernières années sur une augmentation des prix du pétrole et du gaz à long terme, aucune n'avait anticipé le baril à plus de 50\$ à court terme.

Des ressources limitées de combustibles fossiles

Des incertitudes majeures pèsent sur la disponibilité future des hydrocarbures (pétrole et gaz). En effet une partie des experts, en particulier l'Agence internationale de l'énergie, estime que

les progrès technologiques que ce soit pour découvrir de nouveaux gisements, améliorer les taux de récupération ou exploiter les hydrocarbures non conventionnels, permettront de faire face à l'augmentation prévue de la consommation pour les trente prochaines années. Mais d'autres experts considèrent que les données de réserves issues des agences officielles sont erronées. Selon eux, la production (conventionnelle ou non) de pétrole atteindra son maximum physique dans moins de vingt ans, si l'accroissement prévu de la consommation est avéré : 1,6 % par an de 2000 à 2030 selon l'Agence internationale de l'énergie. De même, l'accroissement de la production de gaz naturel pourrait être contraint à l'horizon 2030. Si les géologues ont raison, le prix du pétrole pourrait fortement augmenter de façon structurelle à un horizon 2015. Mais la question d'une éventuelle pénurie d'énergie fossile dépend de la capacité des pays à accroître leur consommation malgré l'augmentation du prix. Le charbon est le combustible fossile dont les réserves sont les plus abondantes. Celles-ci sont surtout localisées aux États-Unis (28 %), en Russie (23 %) et en Chine (11 %). La disponibilité de ressources en charbon bien au-delà de 2020 n'est pas controversée. Mais son pic de production (ou maxima de production) est possible à un horizon 2050. Les réserves d'uranium ne sont pas non plus infinies. À consommation inchangée (ce qui est très improbable), les ressources connues représentent environ 70 ans de réserves pour les réacteurs à neutrons lents (technologie courante). Avec des réacteurs à neutrons rapides (surgénération), qui permettent d'extraire beaucoup plus d'énergie du combustible, ces réserves seraient suffisantes pour des milliers d'années.

Les prévisions de consommation énergétique

Les nombreux scénarios prévisionnels de la consommation énergétique mondiale sont très dispersés : de 10,1 Gtep (scénario Noé du CNRS) ou 11,4 Gtep (scénario C2 du Conseil mondial de l'énergie - CME) à plus de 15 Gtep (scénario WETO 2003 de l'Union européenne, scénario A du CME) à l'horizon 2020. Le scénario tendanciel du CME s'établit à 13,5 Gtep. Cette dispersion s'explique par les hypothèses adoptées pour construire les différents scénarios. Les uns raisonnent en fonction du taux de croissance des consommations énergétiques primaires et prennent en compte les progrès d'intensité énergétique. Dans cette optique, le développement énergétique des pays les moins développés tend à reproduire le modèle que nous avons connu. Les autres cherchent à prendre en compte des politiques plus volontaristes de maîtrise de la demande et un développement énergétique des pays émergents qui « saute » des étapes technologiques.

Les enjeux technologiques liés à l'énergie

Les perspectives énergétiques renvoient à des enjeux particulièrement importants :

- la sécurité et l'indépendance énergétique de la France et de l'Europe ;
- l'épuisement progressif des réserves d'hydrocarbure, et de pétrole conventionnel en premier lieu, dont dépend très largement le secteur des transports ;
- le réchauffement climatique qui pourrait avoir des conséquences dramatiques au cours du prochain siècle.

Les alternatives aux énergies fossiles sont variées. Les modes de production énergétique à moindre contenu en CO₂ sont le nucléaire, la biomasse, dont les biocarburants, la géothermie, les énergies solaire, éolienne et hydraulique. Cependant, le potentiel de la plupart des énergies renouvelables est limité d'ici à 2020 en raison du montant des investissements nécessaires, de la variation du potentiel exploitable selon les régions ou des insuffisances des technologies de stockage de l'électricité. Par ailleurs, les centrales nucléaires et hydrauliques de grande envergure requièrent des délais d'études et de construction de près de vingt ans. L'usage du charbon associé à la capture et à la séquestration du gaz carbonique dans des

champs de pétrole et de gaz épuisés, dans des aquifères salins, ou dans les grandes profondeurs marines est envisageable. Cependant, une lourde incertitude pèse sur l'acceptation du coût énergétique (perte d'efficacité) et financier de la capture du CO₂, du stockage et de son transport. Les lieux de stockage fiables (au moins 100 ans) à proximité des lieux de consommation sont aussi à vérifier.

La production d'hydrogène sans production de CO₂ permettrait d'utiliser pour les besoins énergétiques un nouveau combustible efficace et sans émissions autres que de l'eau. Cependant, outre le problème du volume de stockage, les technologies de production d'hydrogène « propre » en quantité n'en sont qu'à un stade de recherche très en amont (thermolyse nucléaire et photolyse) ou ont des rendements insuffisants (électrolyse). Sa généralisation à l'horizon 2020 est donc improbable. Reste à savoir si l'hydrogène pourrait être produit à plus petite échelle pour stocker l'énergie de sources intermittentes.

À noter que des piles à combustibles pour l'habitat ou les appareils électroniques portables peuvent fonctionner avec un carburant externe plus stable (gaz naturel ou méthanol), l'hydrogène étant élaboré directement à l'intérieur de la pile.

Outre l'amélioration des rendements ou de l'efficacité des objets de consommation énergétique, la maîtrise de la consommation peut passer aussi par l'amélioration de la gestion des flux énergétiques à l'échelle d'un objet (automobile), du réseau électrique, d'un bâtiment, d'une zone industrielle (écologie industrielle) via des objets intelligents « régulateurs » de consommation. Les technologies qui utilisent l'énergie ont souvent une durée de renouvellement plus courte que les technologies de production et affectent un bien plus grand nombre de secteurs économiques.

Les ressources minérales et minières

Les réserves disponibles et le recyclage

On distingue les métaux ferreux (fer, fonte, acier) et non ferreux (autres métaux, dont aluminium, nickel, zinc, plomb...). Parmi ces derniers, on peut isoler les métaux précieux (or, argent, platine et métaux dits de la mine du platine : palladium, rhodium, iridium, ruthénium, osmium), souvent stratégiques pour les industries de pointe.

Contrairement aux ressources énergétiques, l'approvisionnement en matières premières minérales n'attire guère l'attention. Cependant, d'après Jacques Blamont⁶, à consommation inchangée, les réserves connues seront pour la plupart épuisées à la fin du XXI^e siècle. À l'horizon 2020, seule l'extraction de zinc et de plomb devrait atteindre ces limites physiques, mais aussi commerciales (baisse de la consommation due, entre autres, à des législations environnementales et sanitaires plus sévères, part accrue du recyclage).

Une répartition inégale accentuée par les concentrations industrielles : la montée des risques économico-stratégiques

Les ressources minérales sont inégalement réparties sur le globe. Ce phénomène géologique est accentué par les logiques de rentabilité (les coûts fixes de l'extraction sont très élevés et nécessitent un amortissement de long terme) et de concentration industrielle propre au secteur. Suite à l'effondrement de l'URSS et à la chute des prix des métaux qui s'en est suivie (disparition de la demande industrielle soviétique), la décennie 1990 a été marquée par une restructuration drastique. Ont ainsi disparu des filières ou exploitations non rentables pour le producteur, mais pourtant stratégiquement indispensables pour l'utilisateur.

Certains approvisionnements sont dans une situation de dépendance totale ou quasi totale

⁽⁶⁾ Blamont Jacques, 2004, *Introduction au siècle des menaces*, Odile Jacob, Paris.

vis-à-vis d'un ou deux producteurs dominants. Le cas de la Chine est à ce titre doublement exemplaire de la montée des risques économico-stratégiques à l'échelle mondiale :

- grâce à une stratégie commerciale de « prise en ciseaux » des producteurs tiers, elle dispose d'un quasi-monopole sur les marchés de l'antimoine, du tungstène et des terres rares ;
- l'augmentation de sa demande s'est traduite par une augmentation des prix parce que le manque d'investissements productifs et l'autolimitation des capacités de production au cours de la décennie 1990 ne permettaient pas de faire face à des variations rapides de demande.

Les prix : une tendance (passée) baissière, mais des variations brutales

À long terme, le prix des matières premières a été orienté à la baisse (division par un facteur 5 depuis 1850, par 2 depuis 1950). Cependant, les marchés des métaux, du fait de la réactivité limitée de la production, de la concentration de certaines ressources et du caractère non substituable de certains métaux, sont soumis à des variations brutales de prix. Celles-ci peuvent s'expliquer par une raréfaction de l'offre, par exemple du fait d'un conflit dans les zones de production (quadruplement du prix du cobalt en 1978 suite à un conflit au Zaïre) ou d'un « fait du prince » (suspension des exportations soviétiques de titane en 1978-79, de palladium par la Russie en 2001).

À noter l'enjeu spécifique aux métaux high-tech qui présentent un risque spécifique de crise qui découle d'une demande explosive suite à une nouvelle application (cas du rhodium et du palladium utilisés dans les pots catalytiques) ou à un marché en forte croissance comme celui des TIC : forte demande de métaux tels que le tantale (condensateurs), le gallium et le germanium (composants électroniques haute fréquence) ou l'indium (écrans plats LCD) dont le prix est passé de 70 à 700 USD/kg en un an.

Les alliages métalliques utilisés par l'aéronautique ou l'automobile exigent des métaux spécifiques comme le nickel, le cobalt, le tantale, le niobium, les terres rares ou le rhénium. Ces métaux sont produits en faible quantité parfois comme produit principal et souvent des sous-produits du raffinage des métaux de base. Des crises liées à un accroissement rapide de la demande pourraient concerner le germanium (électronique), le rhénium (aéronautique), le gallium (laser et diode blanche) ...

Le marché des platinoïdes, métaux très onéreux et rares, est soumis à de fortes tensions. Leurs propriétés physiques et chimiques les rendent de plus en plus stratégiques pour les industries de haute technologie présentes (électronique, catalyse...) et futures (électronique, environnement, énergie...).

La demande de la Chine et des autres pays émergents

La décennie 1990 a été marquée par l'affirmation de la Chine comme producteur et exportateur majeur sur le marché mondial des matières premières minérales (zinc, cuivre, coke, tungstène). Cette situation s'est brutalement renversée au début des années 2000, la Chine devenant importateur net et l'un des premiers consommateurs mondiaux de métaux non ferreux (cuivre, aluminium, zinc, nickel...) et d'acier.

Selon la direction générale de l'Énergie et des Matières premières (DGEMP) du ministère chargé de l'Industrie, « cette situation devrait entraîner des changements profonds et structurels des marchés mondiaux des métaux et de l'énergie, en déplaçant le centre de gravité des pays consommateurs vers l'Asie, ce qui crée ou risque de créer des tensions sur les prix, et pourrait diminuer l'importance et le contrôle des places occidentales sur les marchés ».

Il n'est pas à exclure que le surenchérissement du prix des matières premières finisse par peser sur la croissance chinoise, en particulier par le biais du coût des infrastructures (acier pour les constructions, cuivre pour les réseaux électriques...). Cependant, selon la direction générale du Trésor et de la Politique économique (DGTPE), grâce à sa base industrielle diver-

sifiée et à ses ressources naturelles, la Chine n'est que modérément exposée à ce type de risque. A contrario, l'Inde se trouve en position de vulnérabilité. Celle-ci pourrait s'accroître par le biais d'une ouverture économique et d'une dépendance accrue. Par ailleurs, l'industrialisation attendue de l'Inde pourrait, au même titre que la Chine, provoquer une nouvelle hausse des cours des matières premières. Cependant, l'horizon temporel et le rythme de l'industrialisation indienne demeurent incertains.

Les enjeux technologiques liés aux matières premières

Les perspectives d'évolution de la demande et des prix des métaux dépendent pour partie des nouveaux débouchés. Parmi les technologies actuellement en cours de développement, certaines pourraient être sources de tensions sur des marchés spécifiques.

Le zinc ou le platine sont des métaux pour lesquels la ressource présente de sérieux risques. Ainsi, à moins qu'émerge un substitut valable, le marché du platine pourrait connaître une augmentation sensible de la demande. D'ici à 2010, elle devrait essentiellement découler d'une augmentation de la demande pour les usages classiques (catalyse et joaillerie) ou nouveaux (piles à combustibles), dans les pays aussi bien développés (normes environnementales de plus en plus drastiques) qu'émergents (la consommation chinoise a plus que triplé entre 1998 et 2002). La recherche de substituts à d'autres minerais stratégiques semble importante car la plupart des gisements sont situés dans des zones politiquement instables. Le recyclage est donc de première importance non seulement pour ces matières premières critiques, mais aussi pour la production d'acier qui peut être produit par recyclage de la ferraille en fours électriques, en complément de la production en hauts-fourneaux à partir d'oxyde de fer. Le recyclage est nécessaire mais ne saura répondre à l'intégralité des besoins : il est indispensable de trouver de nouveaux gisements et de les exploiter à l'aide de processus efficaces. Au-delà, il y a la recherche de matériaux de substitution. La récupération (recyclage) des métaux chers (utilisés par exemple dans l'électronique) ne pose pas de problème, car une forte valeur ajoutée peut être réalisée. Les métaux peu chers le sont beaucoup moins.

La concomitance de la directive de recyclage de l'électronique (D3E d'août 2004) et les crises possibles sur ces métaux high-tech font de la séparation des trente métaux que contient un ordinateur un enjeu particulièrement important. Cela, d'autant plus que les matériels utilisés dans l'informatique et les télécommunications ont une durée de vie qui ne dépasse guère trois ans et qu'il faudra bien gérer ces déchets qui peuvent être pour une part toxiques.

Au niveau européen et français

Le vieillissement démographique

Les projections démographiques des Nations unies - certes discutables en raison des hypothèses qui les sous-tendent - révèlent que la population mondiale pourrait se situer aux alentours de 7,5 milliards d'habitants à l'horizon 2020, l'essentiel de cette croissance s'opérant dans les pays dits du Sud dont la part dans la population mondiale ne cessera de croître. Les pays de l'OCDE, qui représentaient en 1950 près d'un quart de la population mondiale, ne représenteront, sans doute, qu'environ 12 % de ladite population mondiale en 2020. L'Asie à elle seule représente, dès à présent, 60 % de la population mondiale.

Tous les pays du monde, à des périodes différentes, et à un rythme encore plus différent, connaissent un phénomène de transition démographique marqué par le passage d'une nata-

lité et d'une mortalité élevées à une natalité et à une mortalité basses. Si ce processus s'est opéré en Europe à un rythme relativement lent au cours des deux siècles écoulés, il s'opère désormais à un rythme beaucoup plus accéléré dans des pays en développement tels que la Chine ou les pays du Maghreb. Une des conséquences essentielles de cette transition démographique est le vieillissement démographique qui, s'il est particulièrement marqué aujourd'hui dans les pays industrialisés et singulièrement en Europe, touche dès à présent et touchera de plus en plus les pays en développement rapide, comme la Chine et les pays de la rive sud de la Méditerranée.

La chute de la fécondité et les progrès de l'espérance de vie

Le vieillissement démographique en Europe est d'abord la conséquence des évolutions passées de la fécondité, particulièrement de la succession d'une période dite de baby-boom puis d'une période de « baby-krach ». En effet, au lendemain de la seconde Guerre mondiale, tous les pays européens ont connu une forte croissance de leur fécondité (entre 2,7 et 2,9 enfants par femme en moyenne de 1946 à 1964 en France). Puis, tous ces pays européens ont connu, au milieu de la décennie 1960, une chute importante de la fécondité. D'abord, dans les pays scandinaves, un peu plus tard dans les pays d'Europe centrale - l'Allemagne, dès 1974, avait un indice conjoncturel de fécondité de 1,4 enfant par femme - plus tard encore, mais de manière plus brutale, dans les pays d'Europe du Sud (l'indice conjoncturel de fécondité se situant aujourd'hui à 1,2 enfant par femme en Espagne et en Italie). La France a elle-même connu, à partir de 1964, un brutal effondrement de son indicateur conjoncturel de fécondité, qui se stabilise aux alentours de 1,8 enfant par femme.

La mortalité aux âges jeunes puis adultes n'a simultanément cessé de baisser. On observe depuis fort longtemps une croissance régulière de l'espérance de vie à la naissance au rythme, en moyenne, de un trimestre par an (soit un an tous les quatre ans) avec toutefois un différentiel important, entre l'espérance de vie des hommes et celle des femmes et selon les catégories socioprofessionnelles. Ainsi, par un même effet mécanique, environ 60 ans après 1946, il est simple de comprendre que les effectifs et la part dans la population totale des personnes dites âgées (les 60 ans ou plus) augmenteront fortement à partir de 2006, et ceci pendant plusieurs décennies.

Un vieillissement annoncé par les projections démographiques

En dépit même de la timidité des hypothèses adoptées, les projections centrales de l'Institut nationale de la statistique et des études économiques (Insee) révèlent ainsi que la population française passerait de moins de 60 millions à 62,7 millions à l'horizon 2020 (la fourchette des variantes va de 61 millions à 64 millions). La population des moins de 50 ans, dans le meilleur des cas, se maintiendrait en part relative dans la population totale, alors que dans tous les autres cas elle diminuerait. En revanche, la population des 50 ans ou plus, dans tous les cas de figure, augmenterait fortement, l'essentiel de la progression s'opérant d'ici à 2020-2030. Du fait même de l'allongement de l'espérance de vie au-delà de 60 ans, les pays européens, et en l'espèce la France, connaîtront non seulement un vieillissement marqué, mais également, au sein de cette catégorie d'âges, une croissance particulièrement rapide des personnes très âgées.

Nous avons ici affaire à une tendance qui apparaît très lourde, très largement irréversible à l'horizon 2020 et même au-delà. La proportion de personnes âgées de 60 ans ou plus passe ainsi en France, selon les variantes des projections, de quelque 20 % en l'an 2000 à 26,7 %-28 % en 2020 ; celle des 85 ans ou plus progressant (selon la projection centrale) d'environ 2 % en 2000 à 3,4 % en 2020. Les problèmes liés au vieillissement démographique vont se poser d'une manière brutale sur l'ensemble des quarante prochaines années. Cependant, la

croissance habituellement considérée comme continue de l'espérance de vie à la naissance et à 60 ans pourrait fort bien être contrariée, par exemple, par la dégradation des conditions de vie ou encore par la disponibilité de soins adaptés à une population vieillissante.

Des déséquilibres actifs-inactifs et cotisants-retraités

La raison la plus courante pour laquelle on s'inquiète du vieillissement démographique tient à la dégradation du rapport entre le nombre d'actifs occupés et le nombre d'inactifs allocataires, en particulier âgés, c'est-à-dire au déséquilibre entre les ressources et les dépenses des systèmes de retraite essentiellement fondés sur le principe de la répartition. Une première approche simple vis-à-vis du déséquilibre consiste à se référer au rapport entre les 20-59 ans et les 60 ans ou plus. L'Institut national des études démographiques (Ined) a montré que pour maintenir stable le rapport entre le nombre d'adultes (20-59 ans) et le nombre de personnes âgées (60 ans et plus), il conviendrait de remonter l'âge frontière entre ces deux catégories de telle sorte que celui-ci se situe aux alentours de 65 ans en 2020.

L'équilibre des régimes de retraites menacé

Un rapport autrement plus important est celui du nombre de cotisants rapporté au nombre de retraités. Des calculs récents effectués dans le cadre du Conseil d'orientation des retraites (COR) ont confirmé l'ampleur des ajustements à opérer. Sur la base de la réforme adoptée en France en juillet 2003, ils montraient que, sous contrainte d'une évolution démographique tendancielle, d'une amélioration rapide et durable de l'économie et de l'emploi - hypothèse optimiste - et d'une réglementation maintenue en son état jusqu'en 2040, le besoin de financement de l'ensemble du système équivaldrait à 4 points de produit intérieur brut et le taux de remplacement du salaire moyen par la pension moyenne tomberait de 78 % à 64 %.

Assurer, dans ces conditions, l'équilibre financier requerrait soit d'augmenter le taux de prélèvement sur les actifs d'un montant équivalent à 9 points de cotisation, soit de reporter de six ans l'âge de la retraite. De plus, ne sont pas pris en compte dans ces calculs les coûts liés au problème du grand âge et de la dépendance, ni même ceux liés au financement de l'assurance maladie. Le déséquilibre financier des systèmes de retraite ne constitue pas une exception par rapport aux autres régimes de protection sociale. La dynamique des dépenses est telle que, sauf à recourir à un endettement croissant, il faudrait d'ici à 2020 augmenter les ressources dans une proportion d'environ 30 %, à moins évidemment de réduire les dépenses dans une proportion équivalente.

Le problème majeur se trouve et se trouvera de plus en plus dans le déséquilibre croissant entre les ressources et les dépenses du « système ». Les réformes - intervenues en 1993, puis celles de 2003, consistant notamment à exiger un nombre d'annuités de cotisations plus important pour bénéficier d'une retraite à taux plein - ne constituent certainement pas une solution suffisante. C'est en effet une chose que d'exiger un nombre croissant d'annuités de cotisations pour bénéficier d'une retraite à taux plein, c'en est une autre que de savoir si la situation de l'emploi est favorable au maintien en activité des seniors.

Les enjeux technologiques liés au vieillissement

En tout état de cause, le vieillissement démographique soulèvera des questions très importantes et marquera les attentes des individus dans les années à venir en Europe. Du point de vue des innovations et des technologies, vieillir en bonne santé et en gardant son autonomie et ses capacités est certainement une attente majeure. Les enjeux liés au vieillissement de la population active et à l'emploi des seniors sont ici reportés dans la partie « emploi ». L'accroissement du nombre de personnes âgées ne sera pas sans conséquence sur :

- les questions de santé, autant dans le domaine des coûts de santé que sur des besoins spé-

- cifiques concernant les maladies liées à l'âge comme les maladies neurodégénérantes ;
- les besoins de communication avec une ergonomie simplifiée et adaptée à des handicaps relatifs à la vision ou à l'audition ;
 - des besoins de diagnostic ou d'alerte (systèmes d'autodiagnostic, alertes automatisées en cas d'accidents,...) à distance compte tenu de la part croissante de personnes seules parmi les personnes âgées ;
 - les besoins de mobilité afin de permettre aux plus âgés de conserver l'autonomie de déplacement le plus tard possible ;
 - les besoins de services aux personnes, tant les besoins ménagers que les besoins affectifs d'échange et de communication.

L'emploi à l'horizon 2020

Depuis 20 ans, la France vit avec un chômage important (autour de 10 % de la population active) et, plus inquiétant encore, un sous-emploi endémique. Pourtant, périodiquement - lors des périodes de reprise de l'activité économique - le thème des pénuries de main-d'œuvre revient sur le devant de la scène. Les évolutions démographiques, avec le départ à la retraite des générations du baby-boom et la baisse attendue de la population active à partir de 2007, réactivent ces craintes, ou espoirs, car certains y voient la promesse de la fin du chômage et du retour au plein emploi. Pour savoir si ces espoirs sont fondés, il convient d'abord d'observer, séparément, les évolutions passées et futures de la demande (ou encore de la population active) et de l'offre d'emploi (ou besoins de main-d'œuvre).

L'évolution de la population active

L'évolution de la population active (nombre de personnes en emploi ou à la recherche d'un emploi, donc disponibles) sera fonction de deux facteurs : l'évolution démographique générale, soit l'évolution de la population d'âge actif (les personnes âgées de 15 à 64 ans) et les flux migratoires ; l'évolution des taux d'activité (propension à travailler) des hommes et des femmes, aux différents âges. Il est important de noter, dès à présent, que la démographie ne dicte pas tout et que la baisse de la population active, annoncée pour 2006, n'a rien d'inéluctable : si elle risque en effet de se produire à comportements d'activité inchangés, une augmentation des taux d'activité de telle ou telle catégorie peut l'atténuer, voire l'enrayer.

Progression de l'activité féminine et baisse de celle des hommes

L'augmentation sensible du taux d'activité des femmes s'est accompagnée de la diminution de celui des hommes, lié au déclin de l'activité des plus jeunes et des plus âgés. La progression de l'activité féminine se poursuit toujours au fur et à mesure que les jeunes générations, très actives, remplacent leurs aînées sur le marché du travail. Cette évolution s'est observée dans tous les pays d'Europe, même si les niveaux d'activité des femmes restent très différents (il y a encore près de 30 points d'écart entre la Suède et l'Italie).

Faiblesse de l'activité des jeunes et des seniors

Progressivement, avec l'allongement de la scolarité (l'âge moyen de fin d'études a augmenté de 3,5 ans en 40 ans), les jeunes entrent de plus en plus tardivement sur le marché du travail. Alors qu'au début des années 1960, un jeune sur deux était actif, aujourd'hui, c'est à peine un sur trois. De même, à l'autre extrémité de la vie active, les salariés âgés ont longtemps été incités à prendre leur retraite avant l'âge légal. Résultat : le taux d'activité des hommes de 55 à 64 ans a chuté de 79 % en 1962 à 30 % en 1994. Toutefois, il remonte légèrement depuis. On observe ainsi en France, de façon plus marquée que dans les autres pays développés, un resserrement de la population active sur la tranche 25-54 ans, qui concentre aujourd'hui 81,3 % des actifs, contre 61 % en 1962.

Les dernières projections démographiques de l'Insee (scénario central), à l'horizon 2020, font apparaître deux faits :

- la population des 25-59 ans (soit, comme on l'a vu, le cœur de la population active en France) devrait diminuer à partir de 2005 et perdre 120 000 personnes entre 2000 et 2020 ;
 - la population des 60-64 ans devrait croître en revanche, et gagner 1,2 million de personnes.
- Au total, la population d'âge actif (15-64 ans) gagnerait près de 900 000 personnes entre 2000 et 2020, la croissance de la catégorie d'âge des 60-64 ans compensant les pertes dans les autres catégories. La question essentielle est donc de savoir si le taux d'activité des 60-64 ans, qui n'a cessé de baisser, pourrait de nouveau augmenter.

Dans le scénario tendanciel de l'Institut national de la statistique et des études économiques, le taux d'activité des 15-24 ans baisse encore légèrement (de 30,3 % en 2003 à 29,5 % en 2020). Le fait que le taux d'activité des 15-24 ans en France soit faible par rapport à la plupart des autres pays européens s'explique en partie par l'importance de la scolarité (plus de 90 % des jeunes inactifs français poursuivent leurs études) et par le cloisonnement important entre l'école (ou l'université) et le marché du travail. Mais les opportunités d'emploi offertes de 1998 à 2000 aux jeunes ont eu pour conséquence une légère baisse de leur scolarisation ce qui tend à indiquer que les études sont un refuge quand les perspectives d'emploi sont moroses. Les taux d'activité futurs des 15-24 ans dépendront donc de l'évolution de la conjoncture économique, mais on peut aussi imaginer une politique volontariste de développement de l'apprentissage comme en Allemagne où les deux tiers d'une classe d'âge passent par cette étape.

Le taux d'activité des seniors (55-64 ans) a commencé à se relever depuis quelques années, notamment du fait de la suppression des préretraites. Cependant, si le nombre de préretraites n'a cessé de baisser, les bénéficiaires de contrats de cessation anticipée de travailleurs salariés (CATS ou CASA pour l'automobile) sont en forte augmentation : l'Union nationale pour l'emploi dans l'industrie et le commerce (Unedic) en comptait 18 000 à la fin 2002 et 31 000 un an plus tard. De plus, les dispenses de recherche d'emploi (qui permettent aux chômeurs de plus de 55 ans de continuer à percevoir leur indemnisation sans être tenus de rechercher un emploi) approchaient les 400 000 en 2003. Enfin, la multiplication des arrêts maladie de longue durée dans la tranche d'âge des 55-59 ans peut laisser penser que le recours à l'arrêt de travail devient un mode de régulation des départs des salariés âgés. La France affiche toujours, contrairement à d'autres pays développés, une culture de sortie précoce du marché du travail. Pourtant, les travailleurs âgés ne sont pas « inemployables », comme le montre le succès des réformes engagées par les Pays-Bas et la Finlande.

Le vieillissement de la population active

Dans ses hypothèses, l'Institut national de la statistique et des études économiques propose un scénario tendanciel qui voit le taux d'activité des 55-64 ans baisser de 41,7 % (2003) à 41,5 % en 2020. Une variante imagine la remontée de l'âge effectif de cessation d'activité de cinq ans, c'est-à-dire qu'on suppose qu'à terme les personnes de 60 ans se comporteraient, en termes de participation au marché du travail, comme les personnes de 55 ans du scénario tendanciel (et celles de 61 ans comme celle de 56 ans, etc.). L'impact de cette variante se traduirait par un surcroît d'actifs de l'ordre de 2,7 millions à l'horizon 2020 par rapport au scénario tendanciel.

L'âge médian de la population française s'élève et avec lui l'âge médian de la population active. Ce vieillissement de la population active occupée pose plusieurs problèmes qui deviendront de plus en plus aigus dans un pays comme la France à l'horizon 2020 :

- celui de l'évolution des aptitudes suivant les âges, celle-ci étant malgré tout fonction de l'effort de formation qui sera fait au profit des quadragénaires en vue de leur éventuel

maintien en activité, ainsi que de l'amélioration de leurs conditions de travail ;

- celui des coûts salariaux qui, tant qu'ils demeurent directement liés à l'ancienneté, risquent d'augmenter corrélativement ;
- celui, encore plus aigu, du remplacement éventuel des personnes partant à la retraite. En moyenne, environ 40 % de la population active française, si les âges de départ à la retraite restent inchangés, devraient quitter leur emploi dans les dix ans, y compris, par exemple, les dirigeants de PME. Selon une enquête des chambres de commerce et d'industrie, environ 45 % des chefs d'entreprise ont plus de 50 ans, ce sont donc entre 850 000 à 900 000 entreprises de toutes tailles et de tous secteurs qui devraient changer de dirigeants dans les quinze ans à venir.

Les besoins de main-d'œuvre

Depuis 1960, en France, la forte progression de la population active n'a pas été suivie par une progression comparable des créations d'emplois : le nombre total d'emplois n'a augmenté que de 3,7 millions entre 1971 et 2002, tandis que la population active augmentait de près de 5,6 millions sur la même période. En outre, la plupart des emplois créés correspondent en fait à des emplois aidés, l'emploi « hors mesures » n'ayant augmenté que d'à peine 1,6 million entre 1973 et 2002. D'autre part, l'essentiel de cette hausse était concentré sur la période de reprise entre 1998 et 2002, or les chiffres plus récents montrent une nouvelle dégradation de l'emploi (- 67 000 en 2003). De cette faiblesse des créations d'emplois découle l'accroissement spectaculaire du chômage qui, inférieur à 2 % de la population active dans les années 1960, dépasse les 10 % en 1985 et atteint 12,3 % en 1997, pour se stabiliser de nouveau autour de 10 % depuis.

Le chômage n'est pas une fatalité

Le phénomène du chômage atteint tous les pays occidentaux, mais à des degrés très variables. Le contraste entre les pays de l'Union européenne est frappant. Il est possible de distinguer deux groupes, celui des pays qui ont dépassé les 10 % de chômage au cours des années 1980 ou 1990 et qui se maintiennent autour de ce chiffre, comme la France, l'Espagne ou l'Italie, et ceux qui, s'ils ont connu des périodes de chômage relativement élevé, sont parvenus à le faire passer en dessous de 6 %, comme la Suède ou les Pays-Bas.

Le facteur souvent mis en avant pour expliquer ces écarts est la croissance économique. Les pays qui ont réussi à faire baisser leur chômage sont également ceux qui ont bénéficié d'un taux de croissance du PIB supérieur aux autres : le Danemark, l'Irlande, la Norvège et les Pays-Bas ont ainsi connu une croissance de 3,3 % en moyenne sur la période 1990-1998, contre 2 % pour la moyenne européenne. On peut se demander toutefois si la relation croissance-emploi est aussi simple ou si le taux d'emploi, généralement vu comme le résultat de la croissance, n'en est pas plutôt un des moteurs. La faiblesse de celle-ci découle en effet d'une faible demande privée, c'est-à-dire d'une consommation et d'un investissement trop timides. Or, lorsque le taux d'emploi est faible (et le chômage élevé), cela pèse sur cette demande ainsi que sur le budget de l'État (par le poids des transferts sociaux). En revanche, si le taux d'emploi est élevé, les ménages ont les moyens de consommer davantage et cela incite les entreprises à investir.

Les enjeux technologiques liés à l'emploi

Cette question de l'emploi restera un enjeu majeur pour les sociétés européennes et la France en particulier à horizon de dix ans. Ce besoin de création d'emplois et de dynamisation du marché du travail aura des conséquences sur :

- le besoin de formation tout au long de la vie non seulement pour permettre à la partie la plus

âgée de la population active de rester en emploi, mais aussi pour permettre à l'ensemble de la population active de changer de type d'emploi en cours de carrière et de s'adapter plus aisément aux restructurations de l'appareil productif ;

- l'ergonomie des postes de travail et les interfaces homme-machine pour que la productivité bénéficie de l'expérience des travailleurs âgés sans être pénalisée par des aptitudes physiques éventuellement moins performantes qu'à 20 ans ;
- les outils de travail collaboratif nécessaire à l'émergence d'innovations qui requièrent de plus en plus l'assemblage de compétences qu'une personne ou une entreprise ne peut souvent posséder seule ;
- la prise de risque et l'entrepreneuriat qui relève éventuellement d'outils de formation et d'information mais davantage d'innovations socio-organisationnelles et politiques.

La compétitivité économique

Il y a deux manières d'appréhender l'évolution à moyen et à long termes des économies française et européenne : l'une à l'aune des indicateurs économiques classiques (l'évolution du PIB, de la productivité, de la spécialisation productive...) ; l'autre au travers des transformations structurelles des économies modernes et de la capacité de nos propres économies à « prendre le virage » nécessaire pour relever le défi de la compétitivité et de l'innovation.

Le rattrapage de l'Europe

Durant les trente glorieuses (1945-1973), les pays européens rattrapaient les États-Unis. En revanche, tout se dérègle à partir des années 70. Le processus de rattrapage de l'Europe vis-à-vis des États-Unis est alors interrompu. Pire, l'écart se creuse à nouveau. Ainsi, en 2002, le PIB par habitant de la France et de l'Union européenne était inférieur d'environ 25 % à celui des États-Unis. Ce décrochage s'explique couramment par des facteurs différents suivant les pays européens, notamment :

- par une durée moyenne du travail plus courte pour les Pays-Bas, l'Allemagne, la France et la Belgique ;
- par un taux d'emploi plus faible pour l'Italie, la Grèce, l'Espagne, la Belgique et la France ;
- par une plus faible productivité horaire pour le Portugal, la Grèce, l'Espagne et le Royaume-Uni.

On pourrait longtemps dissenter sur ces divergences et les facteurs explicatifs en se gardant toutefois de toute analyse monocausale. Le fait est que les pays européens ont progressivement perdu la production de biens peu sophistiqués : habillement, chaussure, électronique bas de gamme..., au profit des pays émergents. Ainsi, si la production industrielle totale a crû de 13 % entre 1991 et 2003 dans la zone euro, elle a augmenté de 50 % à 450 % dans les pays émergents d'Asie, mais aussi en Europe centrale (100 % en Pologne, 50 % en République tchèque). Explication qui vaut aussi pour les nouvelles technologies puisque la hausse de la production dans ces pays en développement rapide est souvent beaucoup plus forte que dans la zone euro (300 % en moyenne depuis 1993 contre 100 % dans ladite zone euro), particulièrement en Chine (multiplication par 160 en dix ans).

Ces quelques données viennent au demeurant contredire la thèse développée en son temps par Robert Reich qui laissait entendre que nous assisterions à une nouvelle division internationale du travail, la production de biens manufacturés à faible valeur ajoutée se délocalisant vers le Sud tandis que les industries de haute technologie se concentreraient dans les pays du Nord. La période récente révèle, lorsque l'on regarde la balance commerciale, une dégradation générale des économies dites développées au regard des économies en développement rapide. Balance commerciale qui révèle d'importantes différences suivant les pays, y compris en Europe. À titre d'exemple, lorsque l'on compare les pays européens, on observe que :

- la France et l'Allemagne se spécialisent dans des biens d'équipement, et ont des surplus commerciaux importants ou croissants pour ces biens ; il y a naturellement dépendance pour l'énergie et les biens intermédiaires, dégradation en revanche en ce qui concerne les biens de consommation ;
- l'Espagne et le Royaume-Uni ne se spécialisent en rien et ont des déficits importants et croissants pour tous les produits.

Ainsi est-il clair qu'une extrapolation pure et simple de ces indicateurs à l'horizon 2010-2020 n'incite guère à l'optimisme quant aux performances des économies européennes. Mais à moyen et à long termes, il est sans doute plus judicieux de s'intéresser aux transformations structurelles des économies modernes, à leur capacité d'opérer les mutations nécessaires pour relever les défis du futur, y compris ceux d'une concurrence mondiale.

L'évolution structurelle des économies modernes

L'évolution à long terme des économies modernes est marquée par un phénomène général de tertiarisation (ou dématérialisation) qui peut être appréhendé de deux manières tout à fait différentes. La première consiste à se référer à la thèse classique suivant laquelle le développement serait marqué d'abord par l'essor de l'ère agraire, puis par celui du secteur industriel et enfin par celui de l'ère tertiaire. Pour les pays européens, la première moitié du XX^e siècle a été marquée par un déclin relatif du secteur agricole, tant en part de l'emploi que du PIB, et un essor de l'industrie. Depuis les années 1970, nous observons un déclin relatif du secteur industriel tandis que le secteur tertiaire lui-même n'a cessé de croître. Il est toutefois nécessaire de s'interroger sur la pertinence d'une telle grille d'analyse. Il est, par exemple, évident que la production agricole ne cesse de croître alors que la population active y opérant était déclinante. Une autre observation de bon sens consiste à souligner combien les phénomènes d'externalisation des entreprises industrielles vers le « tertiaire » (typiquement les fonctions de services généraux, comptabilité, entretien et maintenance, logistique, informatique...) contribuent à fausser les données dont on dispose au travers d'une telle nomenclature.

Une toute autre manière d'appréhender ce phénomène de tertiarisation, qui nous semble autrement plus pertinente, consiste à souligner le rôle croissant des facteurs « immatériels » dans la valeur de l'ensemble des produits aussi bien agricoles ou agroalimentaires qu'industriels. Tout comme nous avons assisté, dans un premier temps, à un phénomène d'industrialisation de l'agriculture, nous assistons depuis plusieurs décennies à un processus sans doute irréversible de tertiarisation de l'ensemble des activités productives. Ainsi, lorsque l'on décompose le prix des produits agricoles ou agroalimentaires sur une longue période, l'on observe que lesdits facteurs immatériels pèsent d'un poids de plus en plus lourd. Ces facteurs immatériels recouvrent des activités qui vont de la recherche-développement sur les semences, les intrants, les aliments, le progrès génétique sur les plantes et les animaux, jusqu'à - et en aval de la production - la distribution, donc la chaîne du froid, la publicité, le marketing...

A fortiori, plus nous évoluons vers des industries dites de haute technologie, plus cette part de « l'immatériel » tend à augmenter. Ainsi, estime-t-on que, dans le prix d'un microprocesseur, il y a pratiquement 95 % d'immatériel incorporé. Simultanément à ce phénomène de tertiarisation des secteurs primaires et secondaires, nous assistons à la poursuite d'un phénomène d'industrialisation d'activités traditionnellement tertiaires, marchandes ou non marchandes, qui se manifeste par le remplacement de certains services par l'acquisition d'équipements : hier la machine à laver, aujourd'hui les industries culturelles et sportives.

La frontière entre l'industrie et les services devient donc de plus en plus floue. Deux mouvements sont de fait à l'œuvre : d'une part, dans leur recherche d'efficacité, les entreprises industrielles se recentrent sur leur cœur de métier et externalisent y compris des tâches liées à la production ; d'autre part, les entreprises industrielles sont incitées par l'évolution de la

demande à associer une part croissante de services à leurs produits industriels (biens complexes...). Tout cela signifie que les principales sources de valeur ajoutée se déplacent de la possession de matières premières ou de la capacité à produire des biens manufacturés à faible valeur ajoutée vers notre capacité à produire des idées, des concepts qui sont introduits dans les produits, le phénomène étant parfois dénommé par certains économistes comme l'essor de « l'économie de la fonctionnalité », par d'autres comme l'émergence de l'économie de l'immatériel, ou encore par le concept de « révolution de l'intelligence ».

Du fait de cette dématérialisation des activités productives, nous assistons à l'émergence d'une « nouvelle économie » qui n'a rien à voir avec la net-économie des années 2000.

Un nouveau paradigme technico-économique

Cette « nouvelle économie » revêt un certain nombre de caractéristiques particulières. Nous n'en citerons ici que trois qui constituent autant de tendances lourdes :

- la première est relative à la déconnexion croissante entre la croissance économique et la consommation de matières premières minérales et minières, énergétiques et non énergétiques. Ce phénomène étant principalement lié au progrès des sciences et des techniques (rendement énergétique des machines, 50 kilos de fibres optiques transportent autant de messages téléphoniques que nous le faisons auparavant avec une tonne de cuivre...). Elle ne saurait pour autant nous amener à considérer qu'il n'y a plus aucun risque sur les approvisionnements et surtout sur les prix des matières premières (voir l'acier ou le pétrole) ;
- une deuxième caractéristique de cette « nouvelle économie » est incontestablement la déconnexion entre la sphère réelle (la production de biens et de services) et la sphère financière. La déconnexion est telle que, hormis les booms et les krachs, on estime que les flux financiers échangés à travers la planète sont quotidiennement environ cent fois supérieurs à la valeur des transactions commerciales réelles, qu'ils évoluent de manière erratique sans lien rationnel avec le dynamisme de l'économie réelle. Une question tout à fait fondamentale pour les années à venir concerne évidemment la manière de gérer cette tension entre l'activité financière et l'activité réelle des entreprises. Ici réside une incertitude majeure : soit que la financiarisation de l'économie se poursuive, soit que, la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) se développant, la tendance puisse s'infléchir ;
- une troisième caractéristique est évidemment la mondialisation de l'économie. En effet, nous entrons dans une économie qui est beaucoup plus fluide, beaucoup plus volatile, qui s'organise de plus en plus suivant une logique de réseaux à l'échelle internationale, réseaux de plus en plus déconnectés de la logique territoriale sur laquelle demeure assis le principe de souveraineté nationale (ou d'une cosouveraineté européenne). Dès lors que l'économie se mondialise, il est logique que les politiques publiques dans le cadre étroit de l'État nation perdent en efficacité, d'autant que les entreprises s'organisent suivant cette logique de réseaux, au point de former, dans certains cas, des oligopoles mondiaux dont le poids économique et financier excède de loin celui des États (voir Microsoft, par exemple).

Du fait même de cette mondialisation de l'économie, la concurrence s'accroît de manière inéluctable et la compétitivité devient un impératif incontournable.

Les enjeux technologiques liés à la compétitivité

L'inéluctable recherche de compétitivité qui s'impose aux entreprises s'opère pour l'essentiel au travers de quatre types de stratégies qui, même si elles ne sont pas foncièrement nouvelles, s'affirment de plus en plus nettement :

- au travers de la tertiarisation des activités productives, particulièrement de l'agriculture et de l'industrie, celle-ci se traduisant par la multiplication des intrants à caractère immatériel et par le passage d'une production de masse à une production de biens sur mesure, de plus en

plus souvent « service compris ». Cette tertiarisation suppose de plus en plus de coopérations entre diverses entreprises même si elles sont en compétition par ailleurs (cas de l'électronique mais aussi de l'automobile) ;

- au travers d'un phénomène d'industrialisation des services qui, certes, n'est pas complètement nouveau comme en témoigne, par exemple, la multiplication des équipements dans les foyers et, plus généralement, l'automatisation de nombreuses fonctions à caractère tertiaire ;
- cette recherche de compétitivité sur les marchés mondiaux passe inéluctablement par la modernisation de l'État et des services publics. La compétition est aujourd'hui réelle entre les nations et entre les territoires pour fidéliser les investisseurs, les entrepreneurs, les personnes qualifiées, a fortiori les attirer. D'où le défi des territoires qui doivent améliorer leur attractivité relative vis-à-vis des facteurs créateurs de richesse. Ici réside un enjeu majeur auquel on se réfère le plus souvent en parlant de pôle de compétitivité ou d'excellence, de district ou de cluster ;

- cette course à la compétitivité globale entraîne un redéploiement des activités entre les secteurs marchands, non marchands et domestiques. Traditionnellement étaient transférées du secteur marchand vers le secteur non marchand les activités à productivité stagnante. Les secteurs marchands et non marchands étant désormais solidairement confrontés à la compétition mondiale, ils ont tendance à reporter sur la sphère domestique les activités à productivité stagnante ou déclinante (la banque à domicile qui fait réaliser par le client sur son temps de loisir l'activité du guichetier d'autrefois, les associations en complément du secteur public). On observe cependant d'importantes différences suivant les pays. Si la France a fait le choix de supprimer les pompistes et les gardiens d'immeubles, tout autre est le choix opéré, par exemple aux États-Unis ou au Japon. La télé médecine va-t-elle pour une part remplacer le médecin de campagne et la télésurveillance le gendarme du quartier ?

Au-delà de ces différentes stratégies autour desquelles s'organise la recherche de compétitivité, l'innovation apparaît comme un impératif majeur. Dès que l'on parle d'innovation, tout le monde pense d'abord à l'innovation scientifique et technologique. Notamment au travers du développement des technologies de l'information et de la communication (TIC), des biotechnologies et des matériaux nouveaux auxquels il convient d'ajouter les sciences cognitives et, désormais, la « convergence de ces quatre familles de technologies ».

Rappelons d'abord que ces technologies sont radicalement différentes des technologies des générations précédentes dans la mesure où il s'agit de technologies génériques : à la différence des machines d'hier, qui étaient dédiées à un usage unique, un micro-ordinateur, par exemple, ne sert à rien du tout. En revanche, on peut greffer sur ce micro-ordinateur d'innombrables logiciels qui permettront d'en faire de multiples applications. Ce sont par ailleurs des technologies combinatoires : c'est par exemple la combinaison informatique-télécommunications, débouchant sur ce que l'on appelait hier la télématique et aujourd'hui les « autoroutes de l'information » ou encore la combinaison informatique-biologie débouchant sur la biotechnologie. Du fait même que ces technologies sont génériques et combinatoires, elles sont éminemment diffusantes. Elles ont donc vocation à se répandre dans l'ensemble de nos bureaux et de nos usines, dans les espaces publics comme dans les foyers. Pourtant les technologies ne se diffusent pas au rythme où elles sont mises au point mais au rythme auquel la société veut bien se les approprier, fût-ce au prix d'un détournement de l'usage pour lequel elles ont initialement été mises au point.

Soulignons l'importance primordiale de l'innovation socio-organisationnelle qui bien souvent joue un rôle tout aussi important que l'innovation technologique dans le processus de transformation de nos sociétés et de nos organisations. Le processus d'innovation est un processus complexe dans lequel interviennent aussi bien une dimension technologique (à laquelle est principalement consacrée cette étude) qu'une dimension socioculturelle et économique.

On ne change pas la dynamique d'une organisation humaine au rythme où l'on change ses équipements mais bien au rythme où les comportements, les formes d'organisation, le type de management sont capables d'évoluer, non sans remettre en cause au passage des mentalités et des cultures ancrées dans le passé. Le défi de l'innovation socio-organisationnelle se situe à plusieurs niveaux :

- au niveau des formes d'organisation : les experts en organisation soulignent volontiers que nous allons devoir passer des entreprises pyramidales d'hier à des entreprises dites « polycellulaires ». En fait, on réduit le nombre d'échelons de la pyramide, ce qui n'est pas sans poser des problèmes en termes de gestion de carrière et de promotion. Cette structure pyramidale « raccourcie » coexiste avec des équipes projets de sorte que nous nous trouvons de plus en plus face à des organisations dites « matricielles » appelant des modes de management et de gestion radicalement différents. Aussi devons-nous sans doute passer d'un management dit d'autorité à un management participatif exigeant des managers d'être des « catalyseurs d'intelligences réparties » ;
- au niveau des formes d'emploi : hier était prédominant le statut, demain sera sans doute prédominante la fonction qu'elle soit individuelle ou collective, et donc les qualifications requises pour assumer cette fonction. La rémunération, plutôt que d'être déterminée par l'ancienneté, est de plus en plus déterminée par les performances des individus (ou des équipes) au regard d'un objectif donné, et ladite performance, incidemment, déterminera l'employabilité des individus par rapport à d'autres missions qui pourraient leur être dévolues ;
- au niveau des qualifications : de plus en plus sont requises des aptitudes en termes de savoir-être (esprit d'initiative, mobilité, polyvalence...), de culture générale (savoir lire, écrire, compter, savoir se servir d'un ordinateur et, plus généralement, avoir « appris à apprendre ») et, enfin, des qualifications professionnelles dont nous serons amenés à changer à plusieurs reprises au fil d'une carrière.

Technologies clés

technologies

technologies

Technologies clés

Technologies de l'information et de la communication

1	Gestion de la microénergie	59
2	Stockage de l'information numérique	62
3	Processeurs et systèmes	65
4	RFID et cartes sans contact	68
5	Outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information	71
6	Ingénierie des systèmes embarqués	74
7	Composants logiciels	77
8	Infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus	80
9	Virtualisation des réseaux	82
10	Sécurisation des transactions électroniques et des contenus	84
11	Acquisition et traitement de données	87
12	Gestion et diffusion des contenus numériques	90
13	Technologies du web sémantique	93
14	Interfaces humain-machine	96
15	Modélisation, simulation, calcul	99
16	Réalité virtuelle, augmentée, 3D	102
17	Affichage nomade	105

Matériaux - Chimie

19	Matériaux nanostructurés et nanocomposites	117
18	Matériaux pour l'électronique et la mesure	120
20	Procédés catalytiques	123
21	Biotechnologies industrielles	125
22	Microtechnologies pour l'intensification des procédés	128
23	Recyclage des matériaux spécifiques	130
24	Fonctionnalisation des matériaux	132
25	Textiles techniques et fonctionnels	135

Bâtiment

26	Systèmes d'enveloppe de bâtiment	142
27	Matériaux composites pour la construction, à base de matériaux recyclés ou de biomasse	144
28	Gestion de l'air dans le bâtiment	146
29	Gestion de l'eau dans le bâtiment	148
30	Technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment	150

Énergie - Environnement

31	Systèmes photovoltaïques avec stockage intégré	162
32	Systèmes éoliens avec stockage intégré	164
33	Carburants de synthèse issus de la biomasse	166
34	Réacteurs nucléaires de 3 ^e génération	168
35	Valorisation et distribution de la chaleur à basse température par pompe à chaleur	170
36	Composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré	172
37	Capture et stockage géologique du CO ₂ avec nouvelle conception de centrale à charbon	174

38	Contrôle-commande des réseaux et de la puissance	176
39	Mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents	178
40	Technologies physiques amont améliorées de traitement de l'eau	180
41	Automatisation du tri des déchets	182
42	Accélération de la dégradation des déchets fermentescibles et valorisation énergétique	184
43	Traitement des odeurs non confinées	186

Technologies du vivant - Santé - Agroalimentaire

44	Transgénèse	198
45	Thérapie cellulaire	200
46	Protéomique	202
47	Thérapie génique	204
48	Génomique fonctionnelle à grande échelle	206
49	Techniques de criblage et de synthèse à haut débit	208
50	Vectorisation	210
51	Ingénierie des anticorps monoclonaux	212
52	Vaccins recombinants	214
53	Alimentation pour le bien-être et la santé	216
54	Contrôle des allergies alimentaires	218
55	Imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant	220

Transports

56	Architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre	232
57	Travaux d'infrastructures furtifs	234
58	Infrastructures routières intelligentes	236
59	Sécurité active des véhicules	238
60	Architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules	240
61	Sécurité passive des véhicules	243
62	Moteurs à pistons	245
63	Turbomachines	248
64	Acoustique des véhicules	251
65	Architecture électrique des véhicules	253
66	Architecture électronique des véhicules	255
67	Gestion de l'énergie à bord des véhicules	257
68	Liaisons de données véhicule-infrastructure	259
69	Systèmes aériens automatisés	261
70	Positionnement et horodatage ultraprécis	263
71	Gestion des flux de véhicules	265

Distribution - Consommation

72	Technologies d'authentification	275
73	Traçabilité	278

Technologies et méthodes de production

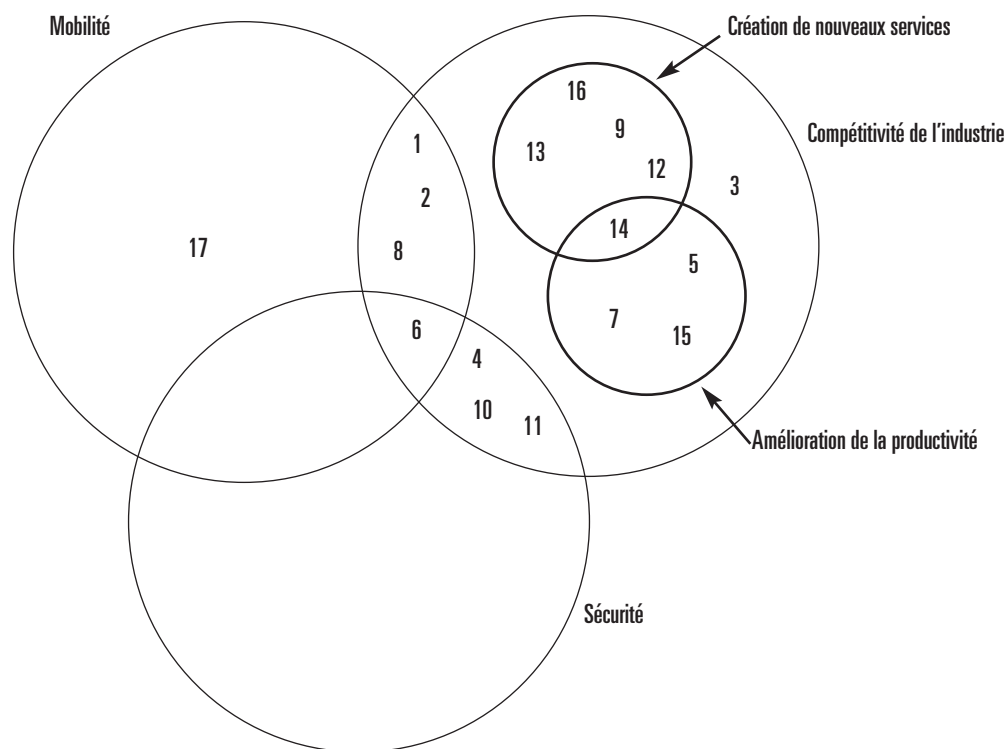
74	Contrôle de procédés par analyse d'image	288
75	Capteurs intelligents et traitement du signal	290
76	Assemblage multimatériaux	293
77	Micro et nanocomposants	295
78	Procédés et systèmes de photonique	298
79	Nouveaux procédés de traitement de surface	300
80	Procédés de mise en forme de matériaux innovants	303
81	Méthodes et outils de coconception	305
82	Ingénierie des systèmes complexes	307
83	Transfert de technologie	310



Technologies de l'information et de la communication

- 1 Gestion de la microénergie
- 2 Stockage de l'information numérique
- 3 Processeurs et systèmes
- 4 RFID et cartes sans contact
- 5 Outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information
- 6 Ingénierie des systèmes embarqués
- 7 Composants logiciels
- 8 Infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus
- 9 Virtualisation des réseaux
- 10 Sécurisation des transactions électroniques et des contenus
- 11 Acquisition et traitement de données
- 12 Gestion et diffusion des contenus numériques
- 13 Technologies du web sémantique
- 14 Interfaces humain-machine
- 15 Modélisation, simulation, calcul
- 16 Réalité virtuelle, augmentée, 3D
- 17 Affichage nomade

Des grands enjeux aux technologies clés



Le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC)

Le contexte

Les TIC : des technologies clés diffusantes

Au cours de ces cinquante dernières années, les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont fortement impacté la qualité de vie en permettant l'accès et l'échange de gran-

des quantités d'information et en autorisant l'essor de nombreux secteurs d'activités (automobile, santé, commerce, etc.). Les TIC contribuent directement à hauteur de 5 % à 6 % du PIB des grands pays européens (8 % aux États-Unis) et, indirectement, à 40 % de la croissance de la productivité en Europe. Les TIC ont donc un rôle important à jouer en ce qui concerne la modernisation et la croissance économique des pays développés et de nombreux pays en émergence.

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

- l'électronique grand public, les équipements audio et vidéo ;

- le matériel informatique : serveurs, PC et périphériques, équipements de transmission de données ;
- les équipements de télécommunication : équipement de réseaux, terminaux, logiciels et services associés ;
- les logiciels et les services informatiques ;
- les services de télécommunication : téléphonie fixe et mobile ;
- les services de l'audiovisuel : télévision, vidéo, cinéma, jeux.

Selon l'Institut de l'audiovisuel et des télécommunications en Europe (Idate), en 2005, le marché mondial des TIC représente 2 681 Md€.

La croissance annuelle de ce secteur était de 6,1 % en 2004 (contre 4,5 %

(milliards d'€)	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Équipements de télécommunication	306	276	256	252	251	252
Services de télécommunication	732	811	859	916	971	1025
Matériels informatiques	276	252	228	228	244	263
Logiciels et services informatiques	498	511	505	528	573	623
Services audiovisuels	260	268	289	309	326	342
Électronique grand public	121	133	145	152	165	176
Total	2 194	2 251	2 283	2 385	2 530	2 681

Source Idate

l'année précédente) et devrait rester supérieure à la croissance générale de l'économie. La part des activités de services y est de plus en plus prépondérante : ceux-ci sont passés de 60 % à 70 % de l'activité en moins de dix ans. Cette proportion peut encore progresser, mais sans doute plus modérément, à 75 %.

Quoique 70 % du marché reste toujours concentré au sein des pays de l'OCDE, le dynamisme constaté au cours de ces dernières années est fortement lié à la croissance des marchés asiatiques et, plus récemment, à la croissance des marchés indiens.

En France, en 2003, le marché des technologies de l'information représentait :

- 10,4 Md€ pour la partie équipement matériel : équipement électronique et semi-conducteurs, équipements de télécommunication et matériel informatique ;
- 20,3 Md€ pour la partie logiciels et services : édition de logiciel, services informatiques, services de télécommunications et audiovisuels.

Le secteur des TIC se caractérise par une haute intensité technologique, laquelle se traduit directement au niveau du marché par un renouvellement rapide des offres et des acteurs en présence. La compétitivité passe par l'excellence technologique, soutenue par une R&D de tout premier plan. Avec un effort de R&D ramené au PIB de seulement 0,31 %, la France, et l'Europe en général (0,27 %), doit intensifier ses efforts

pour rester compétitive par rapport à des pays tels que les États-Unis (0,65 %).

L'équipement matériel

Le chiffre d'affaires de l'électronique mondiale est en croissance (historique) de 11 % en 2005. Selon les analystes, la croissance de ce secteur devrait plafonner aux alentours de 10 % (voire 8 % pour les plus pessimistes) dans les années à venir. Cette croissance est largement liée aux progrès technologiques des semi-conducteurs et à la montée en puissance des acteurs asiatiques qui ont induit une baisse des prix des TIC.

En France, la filière électronique concerne plus de 1 000 entreprises allant de la start-up de quelques personnes jusqu'à la multinationale. Cette filière employait près de 220 000 personnes en 2003. En perte de vitesse, malgré un marché en croissance globale, elle pourrait, selon les professionnels du secteur, perdre progressivement jusqu'à 10 % de ses effectifs par an. Cette filière, stratégique pour le développement économique et la souveraineté de la France, doit faire face à un marché soumis à une forte concurrence internationale.

Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs représentent en moyenne 20 % du prix d'un équipement électronique. Le secteur du semi-conducteur se caractérise par une très forte dimension capitaliste de la production qui induit une concentration

industrielle croissante autour d'un nombre réduit de champions : les dix plus grosses entreprises mondiales se partagent près de 49 % du marché mondial. Les États-Unis dominent le marché du semi-conducteur, en particulier grâce à Intel, leader sur le marché avec un chiffre d'affaires trois fois supérieur à celui du second, Texas Instruments. Avec quatre sociétés parmi les dix premières - trois japonaises, Renesas, Toshiba et Nec, et une coréenne, Samsung - et une dynamique régionale croissante autour du marché chinois (vingt nouvelles unités de production attendues en Chine d'ici à 2008), l'essor des puissances asiatiques paraît assez irrésistible.

L'Europe, quant à elle, compte trois entreprises parmi les dix leaders (ST Microelectronics, Infineon et Philips). Elle bénéficie d'une avance notable sur les produits hautement technologiques avec près de 70 % de ce marché qui représente plus de 15 % du marché mondial du semi-conducteur. Cette position est notamment soutenue par la présence d'équipementiers performants au niveau mondial : ASML - société néerlandaise, n° 1 pour la photolithographie, Wacker Siltronic - société anglaise, leader dans les substrats et le Français Soitec, leader pour les substrats nouvelle génération - silicium sur isolant (SOI). Pour consolider cette position, les acteurs en Europe s'organisent, à l'image de la création de Crolles 2, à Grenoble, qui affiche des objectifs ambitieux.

Les équipements de télécommunication et le matériel informatique

En 2005, l'industrie mondiale des semi-conducteurs est principalement tirée par la téléphonie mobile, les PC et les TV numériques. Avec une valeur ajoutée de 28,6 Md€, le secteur de l'équipement radio, télévision et de télécommunications est très important en Europe et dispose d'un certain nombre de champions, notamment Philips (Pays-Bas) et Siemens (Allemagne).

La France est l'acteur le plus important au niveau européen (17,4 % de la valeur ajoutée de l'UE 25 en 2001), presque à égalité avec l'Allemagne (17,2 %), avec des entreprises comme Alcatel, Sagem ou Thomson. Cependant, la production et l'emploi ont beaucoup chuté dans ce secteur en Europe après 2000. Cette activité s'est fortement délocalisée. Les importations en 2002 sont de 50 % supérieures aux exportations dans ce domaine.

En revanche, et à l'image des difficultés récurrentes de Bull, la situation européenne et française dans le domaine des équipements informatiques est moins florissante : la base industrielle y est affaiblie. Selon Gartner, les ventes d'équipement informatique devraient progresser de 8 % en 2006 pour atteindre un total de 223 millions d'unités. Cette progression est largement liée à la baisse constante du prix de vente, induisant un recul de la croissance du chiffre d'affaires total, soit seulement 0,4 % pour un total de 210 Md\$, partagés par un nombre d'acteurs à la baisse.

Le logiciel et les services

En France, après une période de récession forte entre 2001 et 2003 et dans un contexte économique en amélioration, le secteur du logiciel et des services affichait, en 2004, une croissance de 4 % et

aux alentours de 6 % en 2005. Selon les analystes, cette tendance devrait perdurer au cours des dix prochaines années, portée par trois moteurs structurels puissants : l'innovation technologique liée à la fusion entre l'informatique et les télécoms, l'accélération de la mondialisation et des échanges, et la tendance à l'externalisation.

En France, les entreprises de plus de dix personnes de ce secteur, qui reste un des principaux débouchés pour les diplômés des grandes écoles, ont créé 30 000 emplois en 2005.

L'édition de logiciels

La généralisation du logiciel au sein de l'économie lui donne un rôle de « technologie générique et diffusante », c'est-à-dire une technologie dont l'impact s'étend bien au-delà de son propre secteur industriel puisqu'elle constitue une brique élémentaire qui s'insère dans les processus productifs de nombreux autres secteurs industriels.

La France dispose d'excellentes entreprises dans le domaine du logiciel mais ne détient que quelques champions nationaux parmi les éditeurs : Dassault Systèmes, Business Objects, Infogrames, Ilog et ESI. En vendant de plus en plus de logiciels, des sociétés comme Alcatel, TMM ou Thalès, en France, ou BAE Systems, au Royaume-Uni, réalisent une part de plus en plus importante de leur activité et de leur chiffre d'affaires dans ce secteur.

L'industrie du logiciel reste un domaine où de petites équipes peuvent faire des avancées importantes. À l'instar de SAP, leader allemand sur le marché de l'informatique d'entreprise, ces petites sociétés peuvent rapidement devenir de nouveaux champions internationaux si elles sont bien accompagnées pour transformer un succès technologique en succès commercial. Les PME-PMI innovantes

issues de l'essaimage de grands groupes (France Télécom, Bull...) ou d'établissements d'enseignement supérieur et de recherche (Inria, Télécom Paris, List du CEA...) jouent donc un rôle très important.

De façon générale, les sociétés françaises sont robustes et bien implantées sur leur marché : elles ont un vrai potentiel de recherche, mais pâtissent d'un marché national limité et d'un marché européen manquant d'uniformité, là où les éditeurs américains bénéficient, dès le départ, d'un marché beaucoup plus vaste et régulier. À l'égal de l'ensemble du tissu de PME françaises, elles éprouvent de vraies difficultés à conquérir les marchés internationaux et à grossir.

Enfin il faut noter une relative bonne position de l'Europe en général et de la France en particulier sur le secteur du logiciel libre. Le logiciel libre est au cœur d'enjeux stratégiques et économiques nouveaux. S'il reste à l'heure actuelle modeste, le marché du logiciel libre en France atteint tout de même 211 M€ en 2004 et devrait progresser en moyenne de 41,2 %, pour atteindre 580 M€ en 2008 (source PAC).

Les services informatiques

La relative faiblesse des éditeurs de logiciel français est compensée par les positions de premier plan qu'occupent les intégrateurs français sur un marché toutefois largement dominé par les Américains et les Japonais : Cap Gemini (leader européen), Atos Origin et Steria (respectivement 13^e et 21^e) ou encore Unilog, GFI Informatique, Transiciel, Thalès Services, etc. Le processus de concentration actuellement en cours dans ce secteur (par des jeux d'alliances et de rachats) pourrait s'avérer être à l'avantage des acteurs français.

Le marché de l'externalisation partielle ou totale de l'infrastructure TIC des

entreprises représente près de 25 % du marché des services et logiciels informatiques. Au cours des trois dernières années, il a bénéficié d'une croissance de 10 %, deux fois supérieure à la croissance relevée pour l'ensemble des services. En 2004, la progression des dépenses en matière de services informatiques a été relativement plus importante pour les TPE-PME (2,7 %) que pour les grandes entreprises (0,6 %).

Les services d'information et de communication

Le secteur des services d'information et de communication est l'un des principaux marchés des TIC. Il connaît actuellement une profonde mutation induite par la modification radicale des modes d'échange et de production mis en place par les entreprises, et par l'évolution de la consommation des ménages. Le commerce interentreprises (B to B) représentait en 2003 plus des quatre cinquièmes des transactions électroniques dans le monde. Avec un marché mondial de l'ordre de 1 000 Md et une croissance qui pourrait s'établir à un rythme supérieur à 50 %, il restera vraisemblablement largement dominant en valeur par rapport au e-commerce grand public, même lorsque celui-ci se sera développé (croissance estimée à 20 % l'an).

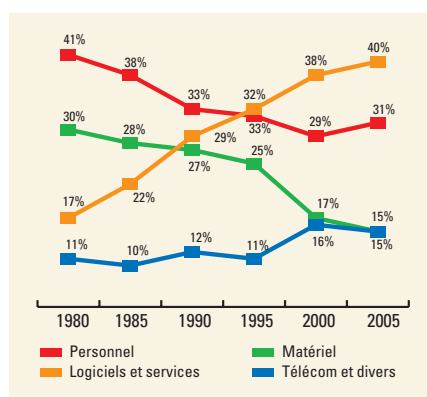
Les services de télécommunication à eux seuls représentaient 38 % du marché mondial des TIC en 2004. Le segment mobile, en progression depuis 2002, a contribué à plus de 80 % de sa croissance. Avec un montant pouvant atteindre près de 1 063 Md\$ en 2008, les communications interpersonnelles représentent la grande majorité de ce marché.

Les enjeux du secteur

Les enjeux transversaux

Les différences entre les performances économiques des pays industrialisés s'expliquent, dans une large mesure, par le niveau des investissements, de la recherche et de l'intégration des TIC dans les outils de production, et par la compétitivité des industries du secteur de la société de l'information et des médias.

Nature de l'investissement en technologies de l'information (IT)



Le défi est donc à présent, pour les différentes économies, d'accélérer les cycles d'adoption des nouveaux produits et services à haute teneur en TIC. Si les industries sont toujours les plus gros consommateurs en matière de TIC, on a pu constater, au cours de ces dernières années, une adoption massive des TIC par les ménages donnant lieu à l'apparition de nouveaux comportements en matière de consommation, d'usages, mais aussi de nouvelles exigences, en particulier en terme de coûts. De fait, les secteurs utilisateurs (services et électroniques grand public) affichent des taux de progression annuelle plus importants que les secteurs fournisseurs (équipements télécoms et informatique).

Les prochaines années seront mar-

quées par l'arrivée de nouvelles tendances lourdes avec :

- les réseaux hauts débits à faible coût, accessibles en tout lieu et à tous ;
- la TV numérique haute définition et la radio numérique ;
- l'administration électronique ;
- l'identité électronique ;
- le dossier médical personnalisé (DMP), etc.

Sur le plan économique, la concurrence est mondiale. L'enjeu pour l'industrie française des TIC est de s'organiser pour faire face aux défis et anticiper la demande des consommateurs, au prix, parfois, de la remise en cause des modèles actuels d'organisation de la production. Il s'agit de saisir les opportunités et de conquérir de nouveaux marchés, en particulier dans les pays dits « émergents ».

Comme le rappelle un rapport du Commissariat général du plan, « l'histoire de l'informatique est traversée de ruptures technologiques et socio-économiques qui ont fait des dominants d'un temps les victimes du suivant ».

Les enjeux spécifiques

Équipement électronique et semi-conducteurs

Les marchés de renouvellement ne suffisent pas à assurer la croissance d'ensemble de la microélectronique qui est fondée sur la pénétration successive et massive de nouveaux domaines d'application. La filière électronique fait face à une mutation profonde, déjà largement amorcée et sous-tendue par quatre orientations de fond :

- l'évolution vers les marchés de masse : l'industrie fabrique 6 milliards d'objets électroniques par an. La baisse des prix est en moyenne de 10 % par an, avec des fonctionnalités toujours accrues ;
- l'augmentation du prix du ticket d'en-

trée : en matière de semi-conducteurs, le coût de développement de chaque nouvelle génération est de 1 Md\$, le coût d'une usine de 2 à 3 Md\$;

- *l'arrivée de nouveaux pays dans la compétition* : en particulier, la Chine fournit aujourd'hui 16 % de la production mondiale et pourrait atteindre 40 % d'ici 2010 ;

- *la consolidation industrielle* : le potentiel de marché appartiendra à un petit nombre d'entreprises efficaces et visionnaires.

Dans ce contexte, l'enjeu majeur pour les entreprises du secteur de l'équipement électronique et des semi-conducteurs en France est de rester dans la course de la compétitivité en :

- renforçant leur positionnement stratégique, notamment sur les marchés de niche ;

- se donnant les moyens de détecter les « vraies » évolutions technologiques et de les transformer en fonctions valorisables (performances-coûts) pour se créer de nouveaux marchés ;

- concevant de nouveaux produits ou services de manière à pouvoir assurer le réinvestissement des deux tiers de l'acquis pour affronter le renouvellement rapide des générations ;

- répondant à l'objectif « zéro défaut » des systèmes embarqués imposés par la pénétration massive des fonctions intelligentes dans les produits du quotidien et dans les systèmes critiques (en particulier automobile et aéronautique). Sur le plan des équipements, l'enjeu majeur est de concevoir des terminaux permettant de supporter la convergence des applications (voix, données, vidéo, paiement sécurisé), la multiplication des standards de communication (Wifi, UMTS, courant porteur, etc.) et ce, pour accompagner tous les aspects de la vie quotidienne (domestique, urbain, professionnel, loisirs, etc).

Logiciels et services informatiques

Le logiciel représente aujourd'hui près de 90 % des coûts de développements des équipements et des produits dans le secteur des TIC, y compris dans le secteur des communications. Pour faire face au cycle de plus en plus bref de renouvellement d'une technologie matérielle et à l'aspect volatil des marchés de niche (perte d'un débouché), les marges sur les matériels sont tirées vers le bas et la valeur ajoutée de l'aspect logiciel devient prépondérante.

Que ce soit pour le logiciel générique, le logiciel embarqué ou les systèmes d'information, la rentabilité et la productivité de l'activité logicielle devient un enjeu majeur pour tous les acteurs des TIC. La nécessité de cette mutation est accompagnée de plusieurs éléments de contexte qui peuvent constituer une opportunité ou une menace pour l'économie française du logiciel :

- *les standards de fait* : promus par les grands du secteur (américains, asiatiques), ils ont tendance à exclure les autres de la course. Bien utilisés, ils peuvent servir de levier ;

- *le logiciel libre* : en émergence croissante, le logiciel libre permet de stimuler le travail en réseau et pourrait constituer une opportunité forte pour l'Europe en général, la France en particulier. Cependant, il manque toujours un *business model* convaincant ;

- *la brevetabilité du logiciel* : sujet soumis à de très fortes pressions et enjeux, la montée en puissance des acteurs asiatiques peut en outre conduire à bouleverser la donne ;

- *l'externalisation des services* (en Chine ou en Inde), ce que les anglosaxons nomment *offshore* : le déplacement des activités dans ces pays à forte croissance économique s'accompagne de l'ouverture massive de nouveaux marchés qui peuvent s'avérer être hau-

tement demandeurs en matière de consommation de TIC.

Services de télécommunication et de l'audiovisuel

En 2005, la convergence numérique est une réalité pour les consommateurs. Les offres triple-play (téléphone, télévision, internet) ont fait leur entrée dans les salons et se multiplient. Les opérateurs télécom et les acteurs de l'informatique utilisent les mêmes technologies et les industries tendent aussi à converger.

Les services de l'audiovisuel, qui représentent 13 % du marché mondial des TIC, doivent faire face à une modification des modes de distribution (sur les réseaux téléphoniques mobiles et ADSL) et de consommation. Fin 2007, 90 % des mobiles en circulation devraient être équipés pour la réception multimédia de type MMS, ralentissant ainsi la pénétration du 3G (3^e génération de mobile) qui devrait attendre encore cinq ans pour toucher une grande majorité des clients, et atteindre son apogée en 2010. Quoique la 3,5G et la 4G soient d'ores et déjà en test (au Japon pour la dernière), la 3G devrait être dominante d'ici cinq ans.

Dans les années à venir, cette convergence devrait s'intensifier et se généraliser à la convergence des services fixes-mobiles. Dans ce contexte, les fournisseurs de services entrent dans la course au développement des bouquets de services (*bundle*) à destination des consommateurs, mais surtout à destination des entreprises qui ont largement investi dans l'équipement mobile au cours des deux dernières années et sont tentées par le développement du concept de « bureau virtuel ».

Les tendances d'évolution du secteur

L'innovation technologique a un rôle très important sur la compétitivité du secteur des TIC. Plusieurs grands programmes européens (plates-formes) permettent de structurer les efforts du secteur de l'électronique et des télécommunications en matière de prospective technologique et de recherche collaborative. On peut distinguer :

- Medea+ : microelectronique ;
- Eurimus 2 : microsystèmes ;
- Pidea+ : interconnexion et « packaging » ;
- Celtic : télécommunications ;
- le programme européen Itea fait référence en matière de prospective dans le domaine du logiciel.

La recherche française, quant à elle, est structurée autour de trois grands réseaux thématiques nationaux :

- le réseau Rntl, pour les technologies logicielles ;
- le réseau Rnrt, pour les technologies des télécommunications ;
- le réseau Riam, pour les technologies de l'audiovisuel.

À l'ère de la convergence numérique, la plupart des tendances en matière de développements prioritaires pour les technologies de l'information et de la communication sont communes et sont portées par les grandes demandes en matière d'applications à destination de l'utilisateur final. En l'occurrence, il s'agit de :

- permettre de façon permanente la connexion à haut débit à moindre coût ;
- assurer, de façon transparente pour l'utilisateur final, la continuité entre les applications, les systèmes d'information et les équipements ;
- intégrer les fonctions intelligentes dans le quotidien (vêtements, habitat...) ;

- prendre en compte la rétroaction du contenu sur la technologie : la manipulation de masses de données sur des durées de plus en plus importantes impose des évolutions technologiques en matière de traitement, de stockage, d'évolution, de pérennité, d'ergonomie, d'interaction ;

- garantir l'intégrité des personnes, la sécurité des biens et des informations ;
- permettre le développement des produits et des services à valeur ajoutée ;
- fournir les outils pour la croissance des secteurs applicatifs et utilisateurs.

De ce contexte général il est possible d'extraire un certain nombre de tendances de fond présentées ci-dessous. Ces tendances se veulent complémentaire de celles proposées dans les fiches décrivant les technologies clés.

La loi de Moore, jusqu'à quand ?

Au niveau des semi-conducteurs, la tendance technologique à horizon 2010 est toujours la miniaturisation.

Comme l'avait prédit Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel, lorsqu'il énonçait en 1965 la « loi » qui porte son nom, l'intégration sur silicium a permis un doublement de la capacité des circuits intégrés tous les dix-huit mois. Certains estiment aujourd'hui que cette croissance pourrait perdurer jusqu'en 2020 environ. Si les années à venir leur donnent raison, la stabilité de cette loi permet d'établir des projections. En 2010, le nombre de transistors gravés sur une seule puce se situerait entre 8 et 16 milliards. Pour comparaison, le nombre moyen de transistors dans un PC complet d'aujourd'hui (processeur, mémoire vive, processeurs spécialisés...) est de 8 milliards. Autrement dit, dans cinq ans nous saurons faire « tenir » un PC entier sur une seule puce. Cependant, quadrupler la capacité des

circuits intégrés tous les trois ans impose de remplacer au même rythme les usines de fabrication par de nouvelles dont le coût double à chaque fois. Aujourd'hui, seuls quelques grands acteurs peuvent encore suivre le rythme de ces évolutions. Dans un contexte de multiplication des puces dans les objets du quotidien, une autre solution consiste à conserver le même niveau d'intégration et à réduire le coût de production des puces. Notons enfin que certaines limites à la loi de Moore apparaissent, en particulier à cause de limites physiques (par exemple en terme de chaleur dissipée).

Les chercheurs proposent déjà des solutions de remplacement selon deux axes :

- la mise au point de nouveaux concepts de transistors : fondés soit sur l'électronique moléculaire et cherchant à tirer profit de l'ingénierie chimique, soit encore sur l'électronique de « spin », tirant partie du moment magnétique de l'électron ;
- la rupture avec la notion même de transistor, en proposant des ordinateurs fondés sur des principes quantiques permettant l'exécution simultanée d'opérations, ou des ordinateurs biologiques s'inspirant du fonctionnement des organismes vivants.

En dehors de l'électronique de spin qui est déjà présente aujourd'hui dans les têtes de lecture des disques durs et bientôt dans les mémoires, il ne faut pas attendre d'applications à court terme de ces travaux : la révolution n'est pas attendue avant 2020.

L'optimisation des investissements logiciels

Que ce soit pour le logiciel générique, le logiciel embarqué, les grands systèmes complexes ou les systèmes d'information d'entreprise, la rentabilité et la pro-

ductivité de l'activité logicielle passe en premier lieu par la maîtrise de tous les aspects du développement logiciel.

Il est donc nécessaire de disposer d'outils opérationnels pour l'aide à la prise de décision soit :

- les outils, méthodes et référentiels d'assistance au processus d'acquisition de systèmes logiciels et à la réduction des risques ;
- les outils et méthodes pour la maîtrise des performances des processus de développement logiciel pérenne ;
- les techniques, outils et méthodes pour la conception, le développement et la maintenance d'architectures logicielles.

Pour disposer de ces outils, trois niveaux doivent être adressés :

- niveau formel : langages de description, modélisation et manipulation de modèles, méthodes formelles pour la vérification et la validation de programmes, langages et paradigmes de programmation, architectures ;
- niveau opérationnel : boîtes à outils spécifiques aux contraintes métier permettant de décrire, concevoir, tester, automatiser les tâches répétitives, etc. ;
- niveau organisationnel : référentiel qualité du cycle de développement (CMM), management des risques, gestion de projet intégré permettant de suivre les étapes du projet de développement, y compris intégrant les fournisseurs, bases de connaissance sur les offres du marché.

De façon transversale, il s'agit de développer des outils intégrés permettant de maintenir une parfaite cohésion entre les différents intervenants (commanditaires, chefs de projet, architectes, développeurs) et de gérer efficacement le cycle de vie du projet logiciel.

L'intelligence ambiante et les systèmes autonomes

Selon Mark Weiser, inventeur du terme *Ubiquitous computing*, après le *main-frame* (un ordinateur, plusieurs utilisateurs), après le PC (un ordinateur, un utilisateur), nous sommes entrés dans la troisième ère : un utilisateur, plusieurs ordinateurs « enfouis » dans le quotidien (téléphone, réfrigérateur, voiture, etc.) et dans le contexte professionnel.

L'informatique devient alors invisible, ce n'est plus l'homme qui doit s'adapter à l'ordinateur, mais l'ordinateur qui doit s'adapter à l'homme. L'accès à l'usage doit être autorisé partout, quels que soient la circonstance, le lieu, l'équipement. De fait, l'interaction avec les équipements et les fonctions intelligentes doit être naturelle. Il faut inventer de nouveaux paradigmes pour réduire le « gap sémantique », écart qui sépare la représentation mentale humaine de la représentation objective de la machine. Les systèmes quant à eux deviennent « sensibles au contexte ». Ils peuvent découvrir et utiliser des informations contextuelles telles que la localisation de l'utilisateur, la date et l'heure, la proximité d'autres utilisateurs et d'autres dispositifs informatiques, les possibilités de connexion à un ou plusieurs réseaux, la bande passante réseau disponible, le niveau de bruit ambiant, etc. Ainsi, et à l'instar du modèle humain, le système informatique doit, à terme, devenir autonome pour appréhender et réagir aux changements rapides : changement de contexte d'utilisation, pannes, attaques, ajout d'un nouvel utilisateur, d'une nouvelle machine. La mise en œuvre de systèmes totalement autonomes demande une maîtrise concertée à tous les niveaux (réseaux, matériel, logiciel et architecture) et constitue un domaine vaste, encore à l'état de recherche, c'est l'*autonomic computing*.

Le plein essor de ce domaine est attendu à horizon 2020. À plus court terme, les systèmes et les utilisateurs doivent apprendre à se compléter, les technologies à les y aider.

La continuité entre applications, systèmes d'information et équipements : les grilles informatiques

Un nombre croissant de systèmes est composé d'un ensemble d'équipements divers connectés les uns aux autres. Le plus souvent, chacun de ces équipements est dédié à une application spécifique mais requiert, pour accomplir sa fonction, une communication avec le monde extérieur et tout ou partie des autres équipements. C'est le cas, par exemple, d'un réseau d'ordinateurs, d'un système de télécommunication, de réseaux de diffusion d'énergie mais aussi d'unités de production décentralisées ou d'applications d'entreprise.

Dans ces réseaux, par essence distribués, les applications sont rendues possibles grâce à une couche logicielle intermédiaire appelée *middleware* ou intergiciel.

Cette couche intergicielle permet, en particulier, de mettre en œuvre ce que l'on appelle les « grilles informatiques » (*Grid Computing* en anglais). Une grille informatique est une construction abstraite qui correspond à la mobilisation d'un ensemble de ressources disponibles à travers un réseau (de PC en grappe, d'ordinateurs au sein d'une entreprise, à travers Internet) pour un besoin particulier : puissance pour des calculs intensifs, partage ou stockage de données, accès à des services disponibles. La notion de grille est structurante pour les entreprises et constitue certainement un défi majeur dans les années à venir. En effet, et au-delà des aspects liés aux capacités de calcul

qu'elle peut fournir, elle permet de globaliser un ensemble de sources d'informations hétérogènes et s'apparente à un système d'organisation virtuelle optimisant le partage d'informations et de processus industriels.

Les grilles informatiques n'apparaissent cependant pas en tant que telles comme technologie clé, mais comme applications à la croisée de la maîtrise de plusieurs technologies dont notamment la virtualisation des réseaux, les technologies du web sémantique ou encore les composants logiciels.

Inventer, innover, industrialiser : l'exemple d'Object Web

France Télécom, Bull et l'Inria ont au départ mis en commun leurs capacités et leurs compétences afin de développer des solutions logicielles libres qui pourraient répondre à leurs besoins individuels. La phase de l'invention s'apparente ici au développement d'une plateforme de serveur d'application en technologies *Open Source* (le serveur d'application Jonas étant un des produits logiciels qu'ils développent et pour lequel ils connaissent un succès grandissant). L'innovation est la raison d'être du consortium Object Web qui a permis à Jonas de devenir une plateforme pérenne, utilisée dans des systèmes critiques et bénéficiant de certifications internationales. La troisième phase est à venir. Le modèle économique d'Object Web reste encore très lié au consortium d'entreprises - les trois fondateurs plus les nombreux autres acteurs qui les ont rejoints depuis la création. Object Web est donc en train de mettre au point un modèle économique qui correspond plus aux réalités du marché.

De l'utilisateur spectateur à l'acteur producteur

La communauté des développeurs du

logiciel libre a depuis longtemps transformé le réseau Internet en un outil d'échange et de collaboration. Dans son sillage, les utilisateurs des TIC n'entendent plus être réduits à de simples réceptacles de l'offre d'information ou commerciale disponibles. Ils deviennent « acteurs » : ils échangent, partagent ou contribuent à une œuvre collective. Ils développent ainsi des communautés sans frontières largement courtisées par les producteurs de contenu, les promoteurs de services ou les fabricants d'électronique qui savent que le succès commercial de leur nouveau produit en dépend. Les architectures de communication de pair à pair (*peer-to-peer*), la généralisation des formats numériques audio et vidéo sont autant de moyens qui permettent à ces mêmes utilisateurs de créer leur propre programme télévisuel, leur propre radio amateur et de les diffuser à travers le réseau Internet.

L'interactivité n'est plus limitée à l'ordinateur. Avec les nouveaux formats de représentation de données, tels que MPEG-4, elle entre dans le salon, en attendant les salles de cinéma. Sur des modes largement inspirés par le secteur des jeux vidéo, le spectateur devient acteur : il peut influencer le déroulement d'une émission télévisuelle, il peut choisir les points de vues du film ou du match de basket-ball qu'il visionne. À terme, la réalité virtuelle pourra même lui permettre d'être au cœur de l'action. De fait, la convergence des secteurs de la production du contenu, de la diffusion, du jeu vidéo, déjà amorcée par le tout numérique, devrait s'intensifier. Au demeurant, ces différents secteurs qui partageront bientôt les mêmes technologies auraient grand intérêt à associer leurs savoir-faire. Au-delà de la maîtrise des technologies, de nouvelles opportunités s'ouvrent en matière de créativité.

La sélection des technologies clés du secteur des TIC

Outre les critères généraux retenus pour la sélection des Technologies clés 2010, les technologies proposées par le groupe de travail thématique ont été qualifiées selon cinq critères majeurs :

- la capacité à lever un « goulot d'étranglement » comme, par exemple, répondre à une problématique de ressource nécessaire mais rare (de type bande passante, temps humain) ;
- l'amélioration de l'aspect sécurité ou sûreté ;
- le renforcement de la souveraineté (au niveau de l'entreprise, d'une région, de l'État), en créant ou confortant une position stratégique ou en contribuant à l'indépendance technologique ;
- la rupture technologique ;
- le positionnement au titre de « plateforme ».

Ces technologies peuvent être regroupées selon cinq thèmes détaillés ci-dessous. Ce découpage offre l'avantage de dissocier les éléments technologiques de leurs applications. Il est complémentaire aux tendances présentées ci-dessus.

Les technologies de base pour les équipements et les systèmes communicants

Cette catégorie regroupe les problématiques de gestion de la microénergie, de stockage de l'information numérique, de processeurs et systèmes, la RFID et des cartes sans contact. Ces technologies sont étroitement liées aux avancées dans le domaine des matériaux pour l'électronique et la mesure.

Les technologies pour le développement d'applications à base de logiciel

Cette catégorie traite de façon générale des outils et méthodes pour le dévelop-

pement de systèmes d'information, et plus spécifiquement de l'ingénierie des systèmes embarqués et des composants logiciels, entités de base de tout développement logiciel actuel. Ces technologies sont à mettre en relation avec des technologies relatives à des aspects organisationnels telles que *les méthodes et outils de coconception ou l'ingénierie des systèmes complexes*.

Les technologies pour le transport et la distribution des données

Une solide infrastructure de communication est essentielle pour permettre l'accès ubiquitaire à l'information et aux services. Trois thèmes centraux ont été retenus dans cette catégorie : *la virtualisation des réseaux*, les *infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus et la sécurisation des transactions électroniques et des conte-*

Les technologies pour la capture, la représentation et la diffusion de l'information

Le passage de la notion « d'interconnexion » à la notion « d'interopérabilité » est certainement le fait majeur de ces cinq dernières années. Il a mis en évidence le rôle central que revêt le contenu, maillon essentiel de la chaîne de communication qui rétroagit sur les technologies.

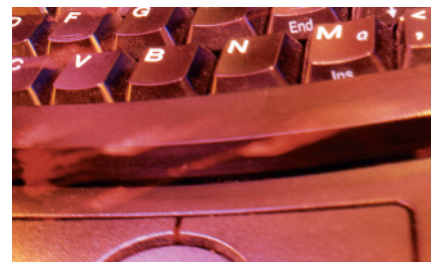
La notion de contenu est ici à prendre au sens large, puisqu'elle reflète la variété des applications rendues possibles par les réseaux de communication, et couvre à la fois le signal, le texte, les images, la vidéo, les programmes informatiques, les services.

Les technologies retenues, *acquisition et traitement de données, technologies du web sémantique et gestion et diffusion des contenus numériques* couvrent les trois aspects liés au cycle de vie d'un contenu : son acquisition, sa représentation, sa distribution.

Les technologies pour la coopération homme-machine

Les quatre technologies suivantes sont liées entre elles par le fait qu'elles permettent une coopération efficace entre l'humain et la machine, dans des contextes de production, de compréhension du monde environnant ou d'usage : *modélisation, simulation, calcul ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; interfaces humain-machine et affichage nomade*.

Technologies de l'information et de la communication



1. Gestion de la microénergie

Description

Les innovations concernant les dispositifs de gestion de la microénergie doivent accompagner et conditionnent, en partie, le développement des applications mobiles : téléphones et PC portables, appareils photo et vidéo, lecteurs MP3, badges RFID actifs... Les technologies de gestion de la microénergie visent des composants actifs moins consommateurs d'énergie ainsi que des composants passifs (résistances, condensateurs, convertisseurs...) et surtout des systèmes de production et/ou stockage plus performants. Ce dernier volet, particulièrement critique, concerne aussi bien les piles et accumulateurs électrochimiques que les supercondensateurs et les piles à combustibles :

- les batteries actuelles des équipements électroniques portables sont très largement des batteries rechargeables (accumulateurs). Les principales technologies utilisées sont le lithium-ion (et lithium-ion polymère), le nickel-cadmium (NiCd) et le nickel-hydrures de métal (NiMH) ;
- les piles non rechargeables sont destinées à des utilisations particulières, par exemple lorsqu'un rechargement n'est pas prévu ou possible (audiophones, équipements utilisés en voyage...). Elles présentent des capacités plus élevées que les accumulateurs. Les piles zinc-air sont particulièrement performantes de ce point de vue ;
- les supercondensateurs équipent depuis plusieurs années les équipements électroniques portables. Ils permettent d'assister les batteries lors des appels de puissance liés à des fonctionnements particuliers des équipements ;
- les applications grand public des micropiles à combustibles devraient se développer dans les prochaines années. La technologie

qui émerge est celle des piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC), utilisant le méthanol comme combustible (on parle alors de DMFC). Les premières commercialisations à une échelle significative pourraient avoir lieu dès 2007, suivant les annonces de grands leaders du domaine ;

- enfin, des travaux plus exploratoires ont débouché sur la mise au point de microgroupes électrogènes, utilisant par exemple une turbine de 12 mm de diamètre, pesant 1 gramme, gravée dans le silicium. Les applications de tels systèmes sont à envisager à plus long terme.

Les développements technologiques sur les systèmes de production-stockage visent les points d'amélioration suivants, en fonction des applications :

- améliorer la capacité (par unité de masse et de volume) ;
- améliorer la puissance ;
- conférer une plus grande robustesse (durée de vie...) ;
- maîtriser le coût ;
- augmenter la vitesse de recharge.

De nouvelles spécifications doivent également être prises en compte : capacité à adopter des formes particulières (souplesse...) et compatibilité avec l'environnement.

Dans ce contexte, les développements sur les matériaux apparaissent comme les principaux leviers d'évolution technologique. Ces développements concernent aussi bien les électrodes que l'électrolyte, que ce soit pour les systèmes électrochimiques « conventionnels » ou les piles à combustibles. Les nanomatériaux représentent une classe de matériaux susceptible de conduire à des avancées significatives en terme de performances de ces systèmes.

Il existe d'autres défis techniques, notam-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies de l'information et de la communication

ment pour les piles à combustibles : gérer les variations de puissance entre l'arrêt, la veille et le fonctionnement, réduire les coûts de fabrication...

Parallèlement aux travaux sur les matériaux, des études sont nécessaires pour améliorer la qualité de l'électronique associée (électronique de contrôle).

Enjeux, Impact

Le marché des équipements électroniques portables et des objets intelligents est en très fort développement et tire avec lui le marché des dispositifs pour la microénergie. Les évolutions technologiques nécessaires font de ce marché un marché à forte valeur ajoutée. Par ailleurs certaines niches à très fort potentiel de développement sont favorables à l'essor de PME, de « start-up » ou de « spin-off » issues de centres de recherche industrielle ou académique.

La France dispose de ressources scientifiques et technologiques importantes en terme de compétences nécessaires, en particulier dans le domaine des matériaux. Par ailleurs, l'expertise technologique et industrielle détenue sur les marchés de la défense et du spatial peut être mise à profit sur les applications grand public.

Marché

Le marché concerné ici est surtout celui de l'électronique portable, notamment pour les applications grand public et de défense. L'alimentation de systèmes embarqués sur les avions ou les engins spatiaux fait également appel à ces technologies, mais le plus souvent pour des dispositifs de taille et de capacité plus importantes. Parmi d'autres applications, on peut également noter l'alimentation des audiophones dans le domaine de la santé (on utilise dans ce cas des systèmes non rechargeables plutôt que des accumulateurs) ou l'outillage sans fil (applications qui peuvent être plus exigeantes en terme de puissance que d'énergie).

L'électronique portable grand public (PC et téléphones portables, appareils photos, lecteurs MP3...) et celle de défense (équipements du fantassin) sont particulièrement concernées par les problématiques de microénergie, et tirent les innovations technologiques. Ces marchés sont importants et

restent en forte croissance, notamment dans les applications grand public.

Le marché des accumulateurs électrochimiques reste largement prépondérant par rapport aux applications des piles à combustibles. Le marché des accumulateurs portables (hors plomb) aurait atteint 6 Md\$ en 2004 dans le monde, pour un volume de 3,7 milliards d'éléments. Le marché est dominé, en valeur et en volume, par les technologies d'accumulateurs lithium-ion, avec 4,2 Md\$ (dont 0,5 Md\$ pour le lithium-ion polymère) et 1,45 milliard d'éléments (dont 100 millions pour le lithium-ion polymère). La technologie NiCd reste importante avec 1,3 milliard d'éléments, mais sur un marché dont la valeur régresse à 1 Md\$. Enfin le marché de la technologie NiMH régresse en volume à 900 millions d'éléments et fortement en valeur à 630 M\$ (-15 %).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie du solide, matériaux, physique des milieux dilués, physique des milieux denses, énergétique, génie des matériaux, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, chimie de base, traitements de surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail des matériaux, procédés thermiques, composants mécaniques, transports, spatial - armement.

■ Pôles de compétitivité : Minalogic (Rhône-Alpes).

Le pôle Céramique présente un axe de travail sur les procédés et les matériaux destinés aux piles à combustible de type SOFC (*Solid Oxide Fuel Cells*) ; si des exemples de produits pour l'électronique portable existent, la technologie SOFC apparaît moins bien placée que la technologie DMFC pour pénétrer ce marché. Le développement de systèmes miniaturisés dans le domaine de l'énergie fait partie des ambitions du pôle Minalogic.

■ Liens avec (technologies) : gestion de l'énergie à bord des véhicules ; RFID et cartes sans contact ; ingénierie des systèmes embarqués ; affichage nomade ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; maté-

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; construction aéronautique et spatiale ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; industrie textile ; fabrication de composants électroniques ; activités récréatives, culturelles et sportives ; éducation ; santé, action sociale.

Technologies de l'information et de la communication

riaux pour l'électronique et la mesure ; recyclage des matériaux spécifiques ; micro et nanocomposants.

■ Principaux acteurs français :

Centres de compétences : CEA, Lacco (Poitiers), LPMO (Besançon).

Industriels : France Télécom, HEF, Saft, Sagem, Sorapec.

La microénergie fait partie des thématiques abordées dans le cadre du réseau de recherche et d'innovation technologique RMNT (micro et nanotechnologies - www.rmnt.org) ; des travaux lancés dans le cadre du

réseau Paco (piles à combustibles) portaient également sur ces sujets.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : BYD (Chine), Duracell (États-Unis), Energizer (États-Unis), Fujitsu (Japon), ITM Power (Royaume-Uni), Matsushita Battery Industrial (Japon), Medis Technologies (Israël, États-Unis), NTT Docomo (Japon), Polyfuel (États-Unis), Sanyo (Japon), Smart Fuel Cell (Allemagne), Sony (Japon), Toshiba (Japon), Ultracell (États-Unis), Uniross (Royaume-Uni), Varta (Allemagne).

Technologies de l'information et de la communication



2. Stockage de l'information numérique

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Le stockage de l'information numérique consiste à enregistrer sur un support les données dans le but de les utiliser pour un traitement, d'y accéder ultérieurement ou de les conserver de manière pérenne.

On distingue deux types de supports de stockage :

- les mémoires de masse, à destination du stockage pérenne ou de l'archivage, reposent sur deux principaux supports qui sont les supports optiques (cédérom, DVD, etc.) et les supports magnétiques (disques durs, disquettes, etc.) ;
- les composants mémoires qui permettent de stocker les données auxquelles on veut accéder rapidement. On distingue les mémoires volatiles (de type DRam) qui permettent un accès rapide, mais ne conservent pas les données lorsqu'elles ne sont plus sous tension (majoritairement utilisées dans les ordinateurs), et les mémoires non volatiles (de type Flash), plus coûteuses qui sont au cœur des équipements nomades (clés USB, lecteurs MP3, etc.).

Le stockage optique utilise une source de lumière de type laser pour écrire et lire les données. Les CD et DVD diffèrent essentiellement par leur capacité de stockage (de 700 Mo à plus de 6 Go). De façon générale, l'amélioration des capacités des supports optiques passe par l'usage de lasers plus performants (lasers violets, bleu-violet) et la capacité à écrire sur plusieurs couches, plusieurs faces ou plusieurs dimensions du support (holographes). Deux nouvelles technologies optiques apparaissent sur le marché : le DVD-HD et le Blu-Ray, pour un stockage de l'ordre de 25 Go.

L'enregistrement magnétique consiste à utiliser les propriétés magnétiques d'empile-

ments de matériaux pour y inscrire des informations au format numérique (succession de 0 et de 1) comme des variations de l'orientation locale de l'aimantation. Les limites de l'enregistrement magnétique sont de fait liées à celles des propriétés physiques des matériaux du support et à la technologie des têtes d'écriture-lecture (magnéto-résistivité), et notamment la gestion de l'énergie nécessaire à l'écriture (modification de l'orientation du champ) et la possibilité pour une technologie de voir augmenter la densité d'information avec les progrès de la fabrication microélectronique.

Les composants mémoire sont réalisés sur base de transistors classiques. De nombreuses firmes travaillent actuellement sur la notion de « mémoire universelle » : une mémoire non volatile haute densité, à grande capacité, à faible consommation électrique, avec les modes lecture-écriture à accès rapide et une capacité d'endurance illimitée. Une telle mémoire devrait pouvoir répondre à la problématique de l'obsolescence du support de stockage, le coût de production restant un verrou central étant donné le caractère massif du marché concerné.

Les technologies actuellement les plus avancées sont :

- les MRam (*Magnetic Random Access Memory*) à base d'électronique de spin (électrons) : introduite en premier lieu par IBM, sa faible consommation électrique, sa résistance aux effets de rayonnement et sa grande capacité de stockage lui confèrent un avantage concurrentiel. Cependant, ses coûts de production restent encore assez élevés ;
- les NRAM (*Nanoscale Random Access Memory, marque déposée*) à base de nanotubes de carbone : les caractéristiques principales de la NRAM sont sa faible consom-

Technologies de l'information et de la communication

mation, sa capacité de stockage et sa résistance aux environnements contraints (hautes et basses températures, environnements magnétiques) ;

- les PFRam (*Polymer Ferroelectric RAM*) à base de films polymères : sa faculté d'empilement (on parle de mémoire 3D) autorise une parallélisation massive des traitements. Ses coûts de fabrication restent proches de ceux de la DRam et elle dispose d'une très longue durée de vie ;

- les PCRam (*Phase Change RAM*) dont le principe est la modification des propriétés de conduction-résistivité à l'occasion d'un changement de phase de matériaux provoqué typiquement par son échauffement ;

- les CBram (*Conductive Bridging RAM*) qui reposent sur le principe de modification de la résistivité d'une solution par diffusion et oxydo-réduction d'ions.

L'évolution de techniques à l'échelle du nanomètre devrait ouvrir de nouveaux axes de développement pour les mémoires.

Au-delà des matériaux, le stockage de l'information numérique passe aussi par des améliorations en matière d'architectures logiques pour l'accès aux données et des techniques de compression permettant de réduire la taille des données à préserver.

Enjeux, Impact

Avec le développement du multimédia et l'évolution des applications informatiques, le stockage et la préservation des données est un problème crucial. La dématérialisation des activités, notamment en matière d'administration électronique, pose des questions relatives à l'archivage des données. Une génération technologique chassant l'autre, l'enjeu n'est pas seulement de préserver les données, mais aussi de pouvoir y accéder dans la durée.

Au cours de ces dernières années, le fossé entre la vitesse de fonctionnement des processeurs et la vitesse d'accès des mémoires s'est accru. La mémoire constitue aujourd'hui un goulet d'étranglement pour les architectures. Les gains en performance sur la vitesse intrinsèque des composants sont relativement faibles. Les fabricants de mé-

moires jouent donc sur l'organisation logique des accès.

La MRam est une mémoire non volatile capable de conserver ses informations sans alimentation. De fait, elle pourrait permettre à un ordinateur de se mettre en veille totale, c'est-à-dire que toute activité consommant de l'électricité s'arrêterait (processeur, ventilateur, disque dur...), et pourrait reprendre en un instant au point précis où il s'était arrêté.

Marché

La quasi-totalité des produits et des activités liés à l'usage de l'information numérique est concernée dont :

- l'archivage des documents administratifs ;
- le stockage des photos et vidéos numériques ;
- l'électronique générale : ordinateurs ;
- l'électronique portable : baladeurs MP3, consoles de jeu, lecteurs vidéo, appareils photographiques.

Le seul marché de la mémoire volatile est estimé à plus de 30 Md\$.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, optique, informatique, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, matériaux - métallurgie, procédés techniques.

■ Pôles de compétitivité : Minalogic (Rhône-Alpes) (www.minalogic.com), Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur). En marge, le pôle Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France) propose d'adresser les problématiques d'archivage audiovisuel.

■ Liens avec (technologies) : matériaux pour l'électronique et la mesure ; gestion de la microénergie ; processeurs et systèmes ; RFID et cartes sans contact.

■ Principaux acteurs français

Mémoires de masse

Dans le cadre du programme Eurismus 2 (www.eurismus.com), le projet franco-allemand MobileDrive réunit le CEA-Leti (Grenoble) et la société MPO France (Averton),

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de composants électroniques ; services aux entreprises ; services personnels et domestiques ; administration.

Technologies de l'information et de la communication

leader en pressage et duplication de CD, cédérom, DVD vidéo, DVD Rom, sur la thématique de mémoires optiques.

Composants mémoire

Centres de compétences : CEA-Leti (Grenoble), Institut d'électronique fondamentale (Orsay), Laboratoire de physiques des solides (Orsay) pour la recherche.

Industriels : ST Microelectronic, Altis, Spintec, Atmel.

Le projet Crescendo du programme Medea+ (www.medeas.org) réunit Imec, Infineon (Allemagne), Philips Research (Pays-Bas), Philips Semiconductors et ST Microelectronic autour du développement d'une mémoire non volatile haute densité.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Le marché des mémoires de masse est dominé par les grands acteurs du contenu, comme le

Japonais Sony, l'Américain Warner et des sociétés taiwanaises. De nombreux industriels, souvent liés à de grandes sociétés, cherchent à créer des positions dominantes sur le marché des composants mémoire : Millipede (États-Unis), Zetta Core Inc (États-Unis), Cavendish Kinetics (Pays-Bas), Nanochip Inc. (États-Unis), Nantero (États-Unis), Sandisk (États-Unis - inventeur de la mémoire « flash »).

Commentaires

En pratique, il est peu probable qu'une mémoire universelle voie le jour, mais la recherche de cet objectif ultime permet des améliorations en matière de procédés, en particulier dans le domaine de la science des matériaux et des nanotechnologies.

Technologies de l'information et de la communication



3. Processeurs et systèmes

Description

Un (micro)processeur (MPU) est la forme intégrée de l'unité centrale (CPU) d'un ordinateur. Ce composant microélectronique est composé de fonctions complexes dont l'unité de calcul logique est l'unité de contrôle. Les microprocesseurs modernes comportent aussi une mémoire de type cache d'une taille importante (1 Mo en 2005). Il faut savoir que cette dernière occupe environ la moitié de la surface totale de la puce. Il faut considérer deux grandes familles de processeurs : les processeurs généralistes et les processeurs spécialisés dans une fonction ou un domaine. La première catégorie, conçue pour un large spectre d'applications de traitement de données, équipe les microordinateurs et les serveurs. La seconde est au cœur des systèmes de traitement du signal (audio, vidéo et maintenant radiofréquence) et de communication (processeur réseau) et des systèmes enfouis et nomades fortement communicants. Un microprocesseur peut aussi intégrer une mémoire centrale vive et morte et des interfaces d'entrée-sortie ; on parle alors de microcontrôleurs MCU (pour *MicroController Unit*).

Le nombre d'opérations élémentaires effectuées par unité de temps est la performance principale attendue d'un processeur. En attendant la mise en œuvre de technologies de rupture (évoquées dans la monographie), cinq axes de développement pour répondre aux besoins futurs peuvent être envisagés :

- augmentation du nombre de transistors sur une petite surface : l'amélioration passe par des techniques d'imagerie et de gravure performantes (lithographie), d'où la réduction de la taille des transistors élémentaires. Ces améliorations ne peuvent être considérées sans leur adjoindre des dispositifs d'évacua-

tion des calories, posant ainsi des problèmes de coûts induits ;

- nouvelles architectures pour les microprocesseurs : architectures multicœurs (*multi-core*), architectures asynchrones ou architectures multitâches. Ces architectures sont basées sur le principe « diviser pour mieux régner » et permettent d'effectuer des traitements simultanés, source de performance ;
- spécialisation des processeurs : à l'inverse d'un processeur généraliste qui doit s'adapter au traitement, la conception d'architectures totalement dédiées à un type de traitement permet des optimisations spectaculaires ;
- évolution vers des systèmes reconfigurables dynamiquement ou statiquement : le support matériel de ces systèmes est le composant logique programmable (par exemple le FPGA pour *Field-Programmable Gate Array*). Une programmation logicielle de ce composant permet de réaliser des traitements complexes au même titre qu'un réseau de processeurs : algorithmes de traitement parallèle (audio - vidéo), fonctions de cryptographie, etc. Il peut être intégré aussi dans un microprocesseur en tant que coprocesseur ;
- intégration de véritables systèmes (processeur, mémoire, capteur, actionneur, etc.) sur une puce (SoC pour *System-on-Chip*) : les SoC constituent une révolution majeure en matière de conception de systèmes intégrés et imposent la mise en œuvre de nouvelles méthodes et outils permettant d'en maîtriser la conception, la vérification et le test.

De façon générale, la complexification d'un système à base de processeurs s'accompagne du besoin croissant d'adjoindre des fonctions logicielles capables d'assurer la liaison entre les ressources physiques et les appli-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies de l'information et de la communication

cations, et permettant de configurer le système pour un usage spécifique.

C'est le rôle du système d'exploitation (OS pour *Operating System*) qui est un des logiciels les plus difficiles à développer et à maintenir à cause de son volume de code. Il revêt des caractéristiques différentes selon le type de matériel auquel il est associé ou selon le type de fonctions qu'il réalise : gestion avancée des ressources (énergie, processeur, mémoire, etc.), gestion des contraintes temporelles fortes (*Real Time System* - RTS), tout en garantissant les temps de réponse.

Les architectures basées sur des cœurs multiples ou l'usage de plusieurs processeurs posent des défis nouveaux aux systèmes d'exploitation qui doivent résoudre des problématiques liées à l'ordonnancement des tâches, la gestion de plusieurs contextes d'utilisation (conflits d'accès aux données, partage du temps processeur), ou bien encore la communication entre les processeurs.

Les qualités attendues du système d'exploitation sont donc la gestion de la complexité de l'architecture matérielle, la performance en terme de calcul, la fiabilité (tolérance aux fautes) et la sécurité, la facilitation de la mise en œuvre d'applications finales. En particulier, le système d'exploitation doit être accompagné d'un ensemble d'outils logiciels permettant aux concepteurs de développer des applications. Aujourd'hui, l'aspect sécurité devient un enjeu prioritaire dans la conception d'OS.

Les évolutions attendues sont en matière de systèmes d'exploitation adaptatifs permettant de gérer l'hétérogénéité de l'architecture d'un système.

Enjeux, Impact

Le couple processeur-système d'exploitation est au cœur de la performance des ordinateurs, du micro-ordinateur au serveur puisant, en passant par les systèmes embarqués dans les objets du quotidien.

L'enjeu central pour les acteurs français et européens est de rester dans la compétition mondiale. En effet, on peut attendre dans les cinq années à venir un accroissement des coûts des équipements permettant la production de processeurs puissants basés sur

des technologies nanométriques (de l'ordre de 50 Md\$ contre 5 Md\$ aujourd'hui). De fait, les solutions alternatives, basées sur des architectures performantes ou l'exploitation logicielle des performances, sont à considérer à part entière.

Si le marché des processeurs généralistes semble dominé par des sociétés bien implantées, la concurrence est ouverte dans le domaine des processeurs et des SoC spécialisés, ouvrant la voie à de véritables stratégies de niche permettant l'émergence de nouveaux acteurs.

Marché

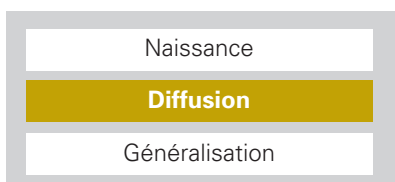
Le marché est colossal puisqu'il s'agit d'équiper les objets « intelligents » de demain, et concerne de vastes secteurs d'application comme :

- l'équipement informatique : ordinateurs et périphériques ;
- l'électronique grand public : consoles de jeux, télévisions numériques, appareils photos, équipement audio et vidéo ;
- l'automobile : électronique embarquée, équipements radio ;
- les télécommunications : routeurs, téléphones mobiles, équipements multimédias portables, organiseurs ;
- cartes à puces : pour des applications de téléphonie, bancaires, de sécurité ;
- le domaine médical ou biomédical pour des applications de surveillance (monitoring) par des biopuces.

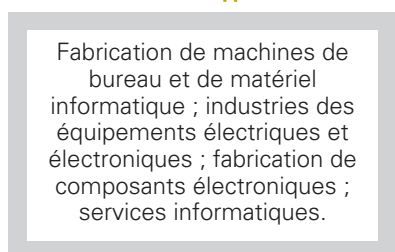
Parmi les différents types de processeurs, on peut citer les exemples suivants :

- les processeurs pour le traitement du signal (DSP) : leur application principale est le traitement du signal numérique (filtrage, extraction de signaux, etc.), en particulier image ou son. Aujourd'hui, ils sont au cœur des systèmes de radiocommunication et représentent, avec 68 %, un marché en pleine croissance. Les communications sans fil sont le principal débouché de ces processeurs ;
- les processeurs graphiques : leur capacité double actuellement tous les six mois. Ils permettent de traiter en temps réel des images réalistes 3D, ou bien encore des vidéos. La multiplication attendue (en particulier grâce à la généralisation du format MP4) d'applications interactives à base de don-

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies de l'information et de la communication

nées multimédias devrait contribuer à pousser les constructeurs à proposer des processeurs de plus en plus performants ;

- la radio reconfigurable (ou radio logicielle - *Software Defined Radio*) : à base de puces généralistes et de fonctions logicielles, les « systèmes radio reconfigurables » permettent de capter et de traiter différents canaux de diffusion sans fil (téléphonie mobile, Wi-Fi, etc.) et permettent aux terminaux d'être « multistandards » ;

- les processeurs réseau (*network processors*) optimisés pour une meilleure connectivité.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, génie des procédés, informatique, électronique.

■ Compétences technologiques : audiovisuel, télécommunications, informatique, semi-conducteurs.

■ Pôles de compétitivité : System@tic (Île-de-France), Minalogic (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : ingénierie des systèmes embarqués, infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus, micro et nanocomposants, matériaux pour l'électronique et la mesure, RFID et cartes sans contact.

■ Principaux acteurs français

90 % des acteurs de la microélectronique en France sont implantés en Rhône-Alpes, en Paca, en Midi-Pyrénées et en Île-de-France. Centres de compétence : CEA-Leti (Grenoble, Crolles), CNRS-INP (Grenoble), I3S (Sophia Antipolis), IRCCyN (Nantes), Lasti (Lannion), ENS (Lyon), LIP6 (Paris), Insa (Lyon), Irista (Rennes), Irista (Toulouse), Inria Rocquencourt, Inria Orsay (équipe Alchemy), Télécom Paris (LabSoc).

Programmes de recherche : Medea+, Pidea, RNRT.

Industriels : ST Microelectronics (leader sur le marché des « SoC »), Atmel Grenoble (anciennement Thomson-CSF Semi-conducteurs) pour la production de processeurs et de systèmes ; Texas Instrument Europe (Villeneuve-Loubet) pour la conception de DSP pour les applications GSM (Global System for Mobile communication).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Intel (États-Unis), AMD (États-Unis), Sony (Japon), Toshiba (Japon), IBM (États-Unis), Hewlett Packard (États-Unis), WindRiver (États-Unis), TVIA Inc (États-Unis), ATI (Canada), NVIDIA (États-Unis).

Les principaux systèmes d'exploitation actuellement sur le marché sont issus des familles suivantes : Linux, PalmOS et Windows.

Commentaires

La bataille se joue à l'échelle européenne. Les enjeux revêtent un caractère stratégique : est-on prêt à assumer la disparition de leaders européens dans le domaine des semi-conducteurs ? Dans ce secteur hautement concurrentiel, soumis à de fortes pressions notamment capitalistiques, et à une course effrénée à l'innovation, les positions de leader peuvent être rapidement bouleversées. La France dispose d'une position intéressante au niveau européen par l'intermédiaire de Crolles qui pourrait renforcer ses liens avec ses concurrents, mais néanmoins partenaires, de Dresde (Allemagne) et Louvain (Belgique) pour créer un pôle européen à l'échelle mondiale.

Technologies de l'information et de la communication



4. RFID et cartes sans contact

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Le sigle anglais RFID (*Radio Frequency Identification*) désigne l'utilisation d'une fréquence radio pour identifier automatiquement un objet ou une personne à travers un objet identifiant physique (tel qu'une carte d'identité, un badge d'accès ou une étiquette de produit) ; par extension, tout procédé permettant de solliciter (et éventuellement alimenter) une puce électronique par des moyens électromagnétiques, et l'équipement correspondant.

Un système RFID s'articule autour :

- de puces électroniques autonomes, à mémoire ou à processeur, voire dotées de capteurs (pression, température, etc.), câblées à une antenne qui leur permet de communiquer par radiofréquence ;
- de lecteurs radio reliés à un système de traitement d'information ou un réseau informatique.

Les technologies RFID sont tout à fait adaptées aux traitements automatiques, puisqu'elles ne requièrent potentiellement aucun contact ni champ de vision particuliers, et peuvent fonctionner dans de multiples environnements, tout en apportant un haut niveau d'intégrité des données. Actuellement deux familles d'applications se dégagent :

- les cartes à puce sans contact, qui peuvent être utilisées dans les transports (télébilletique), pour le paiement, les documents d'identité ou de voyage, l'accès à des bâtiments ou à des services de santé, par exemple ;
- les étiquettes électroniques (*tags*), utilisées pour identifier des objets et véhiculer des informations les concernant (éventuellement à l'aide de capteurs intégrés).

Les caractéristiques attendues de la part des

systèmes RFID dépendent du contexte d'application :

- pour la logistique : coûts marginaux, lectures multiples des étiquettes (*read-only*), possibilité d'ajouter des capteurs pour effectuer des inventaires à la volée, portée adaptée à l'usage, etc. ;
- pour les personnes : haut niveau de protection, portée plus réduite, non falsifiables, etc. ;
- pour les paiements : cartes ouvertes à l'écriture, etc. ;
- pour les applications en milieu « hostile » : résistance aux températures extrêmes, prise en compte des environnements métalliques ou magnétiques, de la pollution électromagnétique, etc. ;

Les technologies RFID en elles-mêmes ne sont pas des technologies d'authentification. L'authentification peut être le résultat d'un traitement (humain ou automatique) des données portées par la puce RFID, faisant intervenir des opérations de cryptographie ou de la biométrie, par exemple. Ainsi, la RFID peut s'avérer utile dans la lutte contre la fraude (cas des cartes de paiement aux États-Unis) ou la contrefaçon des objets (mais aucun standard n'existe à ce stade).

Les étiquettes électroniques sont une technologie d'avenir dans le cadre de l'intégration croissante des outils informatiques dans la chaîne logistique industrielle ou de distribution (traçabilité, gestion des stocks, etc.) d'une part, de la montée en puissance des préoccupations liées à la sécurité d'autre part, ces préoccupations se retrouvant dans de nombreux secteurs (agroalimentaire, par exemple).

Pour cette raison et compte tenu de la maturation rapide des normes et standards, ces technologies sont au cœur de la préoccupa-

Technologies de l'information et de la communication

tion des grands éditeurs logiciels et intéressent de nombreux intégrateurs. L'intérêt économique des étiquettes électroniques est reconnu dans les applications en boucle fermée (atelier de fabrication, flux logistiques internes), dans lesquelles elles sont réutilisées. C'est plus discutable pour les applications en boucle ouverte (logistique interentreprises et distribution), parce que ce type d'application présente une forte composante réseau et des contraintes importantes en termes d'interopérabilité, qui ne sont pas complètement résolues (absence de normes). Un certain nombre de verrous doivent être lever :

- les performances et l'adaptation de la technologie utilisée (notamment la fréquence) en fonction de l'application ;
- l'interopérabilité, en particulier pour des applications en boucle ouverte ;
- le coût, notamment pour les applications en boucle ouverte (actuellement de l'ordre de 20 centimes alors que les grands donneurs d'ordre espèrent 5 centimes) ;
- la structuration et le traitement des données.

Par ailleurs, les performances et la conformité aux standards et normes des étiquettes électroniques et lecteurs associés revêtent des enjeux de compétition forts. Les travaux de l'Iso (*International Organisation for Standardisation*) ont beaucoup progressé ces deux dernières années, dans certains cas sous l'impulsion d'acteurs français reconnus. La standardisation et la normalisation des étiquettes électroniques pour les applications de boucle ouverte suivent celles des cartes à puce sans contact, qui en sont à un stade avancé. La normalisation se limite au système carte-lecteur, en excluant les aspects de personnalisation.

La standardisation des étiquettes électroniques est fortement liée à celle de l'identifiant unique, qui est prévue explicitement dans la norme Iso 18000 pour les étiquettes, et dans les normes Iso 14443 et Iso 15693 pour les cartes. Elle s'étend aux aspects structures de données (formats XML en particulier), voire réseaux-infrastructures. Pour les applications à la chaîne logistique de la grande distribution, l'association GS1 (issue de la fusion de Gencod-EAN et d'UCC-Rosetta-Net) est influente sur les travaux de l'Iso.

Au-delà de la normalisation, les principaux verrous identifiés sont :

- le coût des mémoires embarquées ;
- l'interconnexion antenne-puce et le packaging adapté ;
- la gestion de l'énergie dans les puces ;
- la capacité de lecture tridimensionnelle des étiquettes, indépendamment de leur orientation (en vrac) ;
- le traitement anticollision à haut débit.

La technologie est mature, l'environnement normatif est établi pour les cartes sans contact, en cours de structuration pour les étiquettes électroniques. Le développement promis à ces technologies sera fortement dépendant de l'interopérabilité et de la qualité de l'ingénierie mise en œuvre pour les déployer.

Enjeux, Impact

À l'image du débat sur l'identité numérique aux États-Unis, l'impact au niveau des utilisateurs (individus ou entreprises) doit être pris en compte en amont du développement de la technologie (acceptabilité sociale). La technologie est en mesure d'apporter des réponses attrayantes à de grands enjeux socio-économiques tels que la sécurité, la traçabilité des aliments et produits manufacturés, le contrôle des ressources, pour peu que les problématiques soient formulées suffisamment tôt, de manière pertinente et reçoivent une traduction technique correcte. Depuis les années 2000, les cartes sans contact font l'objet de standards internationaux adoptés par la majeure partie des fabricants, induisant de fait une plus grande ouverture du marché et une meilleure interopérabilité des produits. Les principales normes concernées sont Iso 14443, Iso 15693 et la série des Iso 7816.

Pour les étiquettes électroniques, il s'agit de la série des Iso 18000.

Marché

Le marché mondial de la RFID est estimé entre 2 et 4 Md\$ à l'horizon 2008, données basées sur la généralisation d'applications telles que :

- l'enregistrement et le suivi automatisés de bagages à l'aéroport ;
- l'identification des personnes et contrôle d'accès ;

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

69

Domaines d'application

Ces technologies ont vocation à se diffuser

- dans toutes les industries : industries agricoles et alimentaires ; industrie automobile ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; industrie textile ; commerce de gros, intermédiaires ; commerce de détail, réparations ; services de transports ; postes et télécommunications ;
- dans les services aux entreprises ;
- dans les services et applications aux individus : services personnels et domestiques ; Éducation ; santé, action sociale ; administration.

Technologies de l'information et de la communication

- le porte-monnaie électronique ;
- la gestion fine des produits dans la chaîne logistique des supermarchés ;
- le débit de compte lors d'un passage au péage ;
- la surveillance de zones naturelles inaccessibles ;
- la traçabilité de produits alimentaires ou vivants.

Une étude estime le marché de la RFID pour les objets, en 2004, à 1,5 Md\$ dans le monde, dont 460 millions en Europe et seulement 40 en France, ce qui traduit un certain retard dans l'adoption (ou la mise en place de pilotes) de cette technologie.

De fait, un grand nombre d'acteurs se positionnent sur ce marché en émergence et en cours de structuration, plus avancé pour les cartes sans contact que les étiquettes électroniques pour une utilisation en boucle ouverte.

Les étiquettes électroniques en boucle ouverte vont évoluer de simples « mémoires à antenne » vers des senseurs dotés de capteurs et d'un processeur.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : informatique, automatique, traitement du signal, électronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), Industries du commerce (Nord - Pas-de-Calais), Minalogic (Rhône-Alpes), Sports & loisirs (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : traçabilité ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; sécurisation des transactions électroniques et des contenus ; capteurs intelligents et traitement du signal ; micro et nanocomposants ; gestion de la microénergie ; technologies d'identification ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus.

■ Principaux acteurs français :

Centres de compétence : Leti, Esisar (INPG), Inria Rhône-Alpes, ...

Industriels : Axalto, Gemplus, Oberthur, France Télécom, Inside, ASK, Philips, Atmel, ST Microelectronics, HID, Stella, Sagem, Thales, Tagsys, IER, Athelia, Cipam, Balogh, Cybernétix, ST2, Philips France, Acteos, ...

■ Exemples d'acteurs dans le monde

Pour le software : IBM (États-Unis), SAP (Allemagne), Hewlett Packard (États-Unis), Sun, (États-Unis), Microsoft (États-Unis), Manhattan Associates (États-Unis), Tibco (États-Unis).

Pour le matériel : Giesecke&Devrient (Allemagne), Infineon (Allemagne), Texas Instrument (États-Unis), Analog Devices (États-Unis), Siemens (Allemagne), HID (États-Unis), Sokymat (Suisse), EM Microelectronic-Marin SA (Suisse), Savi Technologies (États-Unis), Hitachi (Japon), Intermec (États-Unis), Alien Technology (États-Unis), ...

Pour la recherche : Auto-ID Labs (MIT, États-Unis), RSA Lab in RFID (États-Unis), Stanford (États-Unis) ...

■ Pour en savoir plus

Association Babysmart (Provence) (www.babysmart-association.com/index.php)

EPC Global (www.epcglobalinc.org)

AIM Global (www.aimglobal.org)

Smart Card Alliance (www.smartcardalliance.org)

Eurosmart (www.eurosmart.com)

Technologies de l'information et de la communication



5. Outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information

Description

Que ce soit pour rationaliser les conduites sociales et économiques, pour réduire les coûts ou pour optimiser la satisfaction du client, les entreprises et les organisations cherchent à transformer en permanence leur système d'information. Les choix en matière d'infrastructures sont alors directement liés aux objectifs stratégiques et commerciaux, et la technologie est utilisée comme moyen pour permettre d'atteindre ces objectifs.

La notion d'urbanisation des systèmes ou d'intégration d'application d'entreprises (EAI) fait référence à l'opération humaine et technologique qui consiste à réorganiser l'architecture des systèmes d'information d'une entreprise ou d'une organisation. L'urbanisation comporte deux aspects essentiels : la mise en œuvre des nouvelles applications et la prise en compte de l'existant.

Pour faire face à la difficulté de mesurer la rentabilité des investissements logiciels, du fait notamment de gains attendus indirects ou qualitatifs visant à améliorer la gestion, à réduire la dérive des délais et des budgets provisionnés et à éviter les risques de rejet de la part des utilisateurs, il est nécessaire de disposer de méthodes et d'outils permettant de mieux gérer les processus d'informatisation.

Ces méthodes peuvent être regroupées en trois catégories, selon les objectifs recherchés.

Estimer les délais, les charges. L'urbanisation d'un système d'information doit être pensée en termes de logique d'investissement économique, par définition risquée. C'est aux décideurs de fixer le niveau de risque acceptable en regard des gains proba-

bles escomptés. Cette étape peut se révéler difficile, notamment pour les petites sociétés moins structurées qui doivent se faire accompagner ou disposer d'outils d'assistance au processus d'acquisition de systèmes logiciels et à la maîtrise des risques. Elles doivent en particulier être en mesure de déchiffrer l'offre disponible.

Conduire les activités de projet. Il s'agit de développer des outils intégrés permettant de maintenir une parfaite cohésion entre les différents intervenants (commanditaires, chefs de projet, architectes, développeurs) et de gérer le cycle de vie du projet informatique selon les référentiels qualité. En particulier, les acteurs du projet doivent être en mesure de contrôler la conformité des développements et les exigences du cahier des charges. De nombreux outils et référentiels ont été développés par la communauté du logiciel libre qui a montré la voie en matière de développement collaboratif maîtrisé. Certaines grandes entreprises ont capitalisé sur cette expérience pour développer en interne des environnements de gestion de projet basés sur des briques du libre. La plupart des entreprises n'ont, cependant, ni les compétences techniques ni le temps pour assembler leur propre plate-forme. Les grandes firmes, positionnées sur le marché des environnements de développement logiciel, prévoient d'étendre leur offre en proposant des solutions intégrées de gestion du cycle de projet dans sa totalité.

Concevoir les systèmes d'information. Les techniques usuelles de EAI (*Enterprise Application Integration*) se basent sur l'envoi de messages entre applications demandeuses et applications offreuse (par le biais d'un

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies de l'information et de la communication

bus gérant les messages). Plus récemment, l'urbanisation des systèmes évolue vers une intégration sur la base d'architectures orientées service (SOA - *Service Oriented Architecture*) héritées des technologies utilisées pour construire les applications à base de services sur Internet (par exemple le e-commerce). L'approche SOA se base sur quatre grands principes :

- construction sur la base de protocoles standardisés ou en voie de standardisation dans le monde des web services (standards SOAP, WSDL, UDDI) ;
- intégration facile des services sur la base de leur description, c'est-à-dire sans que cela nécessite d'accéder au code informatique du logiciel à intégrer ;
- neutralité technologique, quel que soit le langage de programmation dans lequel le logiciel est réalisé ;
- découverte dynamique de nouveaux services disponibles. L'approche SOA apporte en particulier une notion d'asynchronisme (également nommé EDA pour *Event-Driven Architecture*) qui répond aux enjeux récurrents de flexibilité.

Les progrès attendus en matière de SOA concernent les langages complémentaires pour la gestion des transactions ou de la sécurité. Le niveau de maturité et de stabilité actuel de ces langages (par exemple WS-Security) étant assez variable est considéré comme un frein à sa généralisation.

Enjeux, Impact

En raison des coûts d'investissement engagés et de l'impact potentiel des nouvelles technologies de l'information sur les structures et les stratégies organisationnelles, le développement de systèmes d'information constitue un enjeu important pour les entreprises et les organisations dans tous les secteurs de l'industrie, du commerce, des services marchands et non marchands.

Selon une étude Borland menée en France, 16 % des projets tiennent leurs engagements, tandis que 37 % sont purement et simplement arrêtés en cours de route. Les 47 % restants dépassent les délais ou le budget initialement prévus.

La maîtrise des développements de systèmes d'information est centrale pour tous les acteurs concernés :

- pour les clients (administrations, PME, industrie), il s'agit de maîtriser les paramètres liés à la pérennité de leur investissement financier et de limiter la prise de risque ;
- pour l'industrie du logiciel et des services informatiques, l'enjeu est d'accroître leur capacité à prédire et à contrôler la qualité des produits, à planifier, à évaluer le coût et le cycle de renouvellement et la productivité des équipes de développement. Il s'agit aussi de maîtriser les risques liés à des projets de développement fortement délocalisables ;
- pour les développeurs, il s'agit d'accroître leurs capacités à analyser, prédire et contrôler les caractéristiques fonctionnelles des logiciels qu'ils développent.

Marché

La maturation rapide mais encore inachevée des standards et des technologies relatives aux SOA n'a pas empêché un ensemble d'acteurs de l'industrie informatique de se positionner, dès l'arrivée même des web services, sur un marché qui est devenu un des plus visibles et des plus porteurs.

Le marché des environnements intégrés de développement d'applications logicielles, traditionnellement très lié aux langages de programmation, s'ouvre à des solutions plus complètes permettant de gérer la totalité du cycle du projet de développement informatique. En plus des éditeurs traditionnels (IBM, Microsoft, Sun, Borland), ce marché attire les éditeurs de progiciels d'entreprises (Sap, Oracle), les acteurs venant des web services (tels BEA, aux États-Unis) ou des services mobiles pour l'entreprise. De fait, on assiste à des mouvements de concentration des acteurs, par le biais d'alliances ou de rachats, et à l'entrée de nouveaux acteurs. Ce marché, longtemps très tourné vers les grands comptes, s'ouvre aux PME et aux administrations en proposant des solutions adaptées à leurs besoins spécifiques.

Les premiers marchés concernés par les outils et méthodes pour le développement des systèmes d'information sont :

- le marché de la prestation de services pour l'intégration logicielle (consulting, intégration, support technique) qui est en croissance continue depuis 2003 et qui devrait atteindre 66,2 Md en Europe de l'Ouest en 2006 ;

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Édition, imprimerie, reproduction ; industrie automobile ; construction aéronautique et spatiale ; fabrication de composants électroniques ; services de transports ; activités financières ; activités immobilières ; postes et télécommunications ; services informatiques ; services aux entreprises ; recherche et développement ; éducation ; administration.

Technologies de l'information et de la communication

- le marché des logiciels d'entreprise qui représentera 661,3 Md\$ au niveau mondial en 2008.

Il s'agit d'un marché sur lequel sont positionnés les acteurs majeurs de l'édition logicielle et les SSII.

Le développement de systèmes d'information concerne aussi le marché de l'e-gouvernement qui est en pleine expansion, bien que les investissements restent inégaux selon les pays.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : informatique, mathématiques et leurs applications, sociologie, démographie, droit et sciences politiques, économie et gestion,

■ Compétences technologiques : informatique, technologies organisationnelles

■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), System@tic (Île-de-France), Loisirs numériques (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : composants logiciels ; ingénierie des systèmes embarqués ; virtualisation des réseaux ; technologies du web sémantique ; gestion et diffusion des contenus numériques ; méthodes et outils de coconception ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CNRS-Pirtem, Comité interministériel pour l'informatique et la bureautique dans l'administration (CIIBA), pôle productique Rhône-Alpes, le club URBA-SI (www.urba-si.asso.fr), le Cigref (www.cigref.fr).

Industriels : Business Object, Ilog, Adonix, Cartesis, Capgemini, Sage, Atos Origin, Steria, Unilog, GFI Informatique, Transiciel, achatpublic.com (CDC, France Télécom, Groupe Moniteur, Ugap, Dexia).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : AmberPoint (États-Unis), BEA Systems (États-Unis), IBM (États-Unis), Intalio (États-Unis), Microsoft (États-Unis), Oracle (États-Unis), SAP (Allemagne), Sonic Software (États-Unis), Sterling Commerce-SBC (États-Unis), EAI Systinet (États-Unis), Tibco (États-Unis), Borland (États-Unis), Sun (États-Unis).

Commentaires

À travers les évolutions des technologies de l'information et de la communication, les schémas classiques du management, de la décision et de l'organisation sont ainsi amenés à être complètement repensés. Des travaux de recherche sont encore nécessaires pour aider à comprendre les relations entre les technologies de l'information et les pratiques du management des organisations.

Technologies de l'information et de la communication



6. Ingénierie des systèmes embarqués

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

L'ingénierie des systèmes embarqués fait référence aux méthodes, techniques et outils (équipements, logiciels, plates-formes) pour la conception et le développement de sous-systèmes intelligents capables de contrôler une large gamme d'équipements électroniques (appareils photos, téléphones mobiles), de systèmes industriels (usines, production d'énergie), d'infrastructures (réseaux de diffusion d'énergie).

Les systèmes embarqués peuvent être vus comme des ordinateurs enfouis dans les équipements électroniques du quotidien (téléphones, voitures, avions, satellites, engins industriels). Ils sont souvent développés pour une application particulière et sont soumis à des contraintes fortes : faible consommation, capacité mémoire réduite, temps réel, communication, etc.

Le logiciel prend une place de plus en plus importante dans les systèmes embarqués si bien que certaines fonctions qui étaient assurées par du matériel (hardware) deviennent du logiciel (software). Ainsi la frontière entre le matériel (répondant à des questions de performance) et le logiciel (utilisé pour sa flexibilité) est de plus en plus floue. L'utilisation de la coconception matérielle-logicielle n'étant pas encore généralisée, les techniques usuelles de conception de systèmes embarqués conduisent à spécifier de façon disjointe le hardware et le software, ce qui engendre plusieurs inconvénients :

- le manque de représentation unifiée des fonctions software-hardware rend difficile la vérification du système dans son ensemble et peut entraîner des incompatibilités hardware ;
- la définition a priori de la répartition des fonctions hardware-software conduit à des

conceptions non optimisées (manque de continuité) ;

- le manque de visibilité au niveau des spécifications fonctionnelles rend les révisions difficiles, ce qui a un impact direct sur le temps de mise sur le marché.

Les méthodes d'ingénierie des logiciels en général servent de cadre (voir aussi composants logiciels) pour l'ingénierie des systèmes embarqués mais doivent faire l'objet d'adaptations pour tenir compte des contraintes spécifiques au domaine de l'embarqué. Plusieurs défis technologiques doivent être affrontés :

- méthodes de conception permettant d'optimiser la performance et la consommation d'énergie ;
- langages de spécification et de modélisation adaptés aux problématiques spécifiques de l'embarqué, c'est-à-dire temps réel, tolérance aux fautes, sécurité, embarquabilité... et les boîtes à outils associées ;
- méthodes de test et de vérification formelle adaptées aux systèmes embarqués (validation par construction, prise en compte des contraintes matérielles...) ;
- méthodes pour l'intégration de composants réutilisables certifiés (COTS - *commercial off the shelf*) ;
- architectures (logicielles) pour systèmes embarqués distribués, communicants et hétérogènes ;
- autonomie des systèmes par adjonction de fonctions « intelligentes » ;
- réduction de la vulnérabilité des systèmes embarqués aux attaques extérieures (virus, intrusions, etc.).

Les outils associés permettant d'assister la production doivent être développés. Ils concernent :

- le langage de programmation et les compilateurs ;

Technologies de l'information et de la communication

- les ateliers de développement intégrant les outils de modélisation, exécution et vérification ;
- les outils d'aide à la décision relatifs au choix de la répartition des fonctions (liés à la vérification et à la simulation) ;
- les ateliers de coconception matérielle-logicielle ;
- les plates-formes de cosimulation.

La généralisation des systèmes embarqués dans l'environnement quotidien tend à s'appuyer sur les capacités des systèmes hétérogènes à communiquer et à s'adapter aux changements de contexte. De fait, des systèmes embarqués provenant de divers équipements et de diverses origines doivent pouvoir interopérer. Cela induit la nécessité de disposer de standards ouverts prenant en compte les spécificités des équipements embarqués.

Enjeux, Impact

Dans les systèmes critiques (avionique, nucléaire, spatial, etc.) les comportements doivent être garantis car des défaillances peuvent avoir des conséquences irréversibles (vies humaines en péril par exemple). L'acceptabilité des fonctions logicielles (leur utilisation et leur généralisation) est donc en jeu. Dans le développement de systèmes moins critiques, des compromis entre plusieurs critères comme la qualité de service, les coûts, les délais de conception et de déploiement ou la consommation d'énergie des équipements, la sécurité doivent être déterminés.

Pour les grands intégrateurs, l'ingénierie des systèmes embarqués impacte directement les coûts et délais de développement : près de la moitié des projets de développement des systèmes embarqués sont lancés avec plusieurs mois de retard, et moins de la moitié de toutes les conceptions atteignent leurs objectifs de départ en matière de performances. Ces difficultés sont principalement dues à la complexité de la réalisation de tels systèmes. Cela entraîne une perte importante en termes de parts de marché accessible et de chiffre d'affaires, mais aussi, dans le cas de mise sur le marché de produits défectueux, en termes d'image.

L'environnement normatif dans le secteur des logiciels embarqués en est à ses débuts.

Il est encore largement possible pour les acteurs français et généralement européens de s'imposer, d'autant que l'Europe dispose en la matière d'acteurs de premier ordre.

Marché

Les systèmes embarqués (*Embedded Intelligent Systems*) sont enfouis dans la majeure partie des équipements du quotidien et concernent la quasi-totalité des secteurs d'activité, par exemple :

- le transport automobile et aéronautique : assistance à la conduite et à la commande de vol, maintenance des véhicules, contrôle aérien ;
- le spatial : véhicule orbital ;
- la défense : contrôle de trajectoires, lanceur ;
- le secteur de la santé : équipement de diagnostic médical et de soins ;
- le secteur manufacturier : automatismes industriels, dispositifs de sécurité, assistance à la maintenance ;
- l'électronique grand public : appareils photographiques et vidéo, lecteurs DVD, gros électroménager ;
- les télécommunications : téléphones, switches, routeurs ;
- l'agriculture : robots, surveillance.

En 2003, on pouvait dénombrer 8 milliards de composants électroniques embarqués dans le monde. Selon une estimation, ce nombre pourrait passer à 16 milliards en 2010, soit une moyenne de trois par personne (source *IST-High-Level Group on Embedded Systems*). Le seul marché mondial des systèmes d'exploitation embarqués devrait progresser de 700 M\$ en 2004 à plus de 1,1 Md\$ en 2006 (source VDC).

Le logiciel embarqué est de surcroît le secteur des TIC qui dispose du plus fort potentiel de croissance pour les années à venir. Selon l'Idate, les activités de recherche-développement en logiciel devraient connaître une croissance de 130 % entre 2002 et 2015 (ce qui représentera alors 132 Md€ de dépenses de R&D) sur les six secteurs agrégés : aéronautique, automobile, automatismes industriels, télécommunications, équipements de santé et électronique grand public.

Le secteur des systèmes embarqués représente, à ce jour, 460 000 développeurs dans

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; services de transports ; postes et télécommunications ; services informatiques ; services aux entreprises ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques.

Technologies de l'information et de la communication

le monde et devrait croître de 10 % par an les prochaines années et ainsi atteindre près de 700 000 en 2010 (source Artemis - *Strategic Research Agenda*).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : informatique, automatique, électronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : télécommunications, informatique, semi-conducteurs, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : Images et réseaux (Bretagne), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), System@tic (Île-de-France), Minalogic (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie).

■ Liens avec (technologies) : contrôle-commande des réseaux et de la puissance ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion de la microénergie ; processeurs et systèmes ; RFID et cartes sans

contact ; composants logiciels ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus ; virtualisation des réseaux ; sécurisation des transactions électroniques et des contenus ; acquisition et traitement de données ; affichage nomade ; contrôle de procédés par analyse d'image ; imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant ; capteurs intelligents et traitement du signal ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inria, CNRS-LAAS (Toulouse), CEA, IERSET (Toulouse), CNRS-INPG-Verimag (Grenoble), LaBRI (Bordeaux). Industriels : Esterel technologies, Aonix, Sogeti-Transiciel, Memscap, Tronics, Alcatel Space Industries, Comau Systèmes France, MBDA (Matra BAE Dynamics), SC FLUIDS, ST Microelectronics, Datavision, Thalès, EADS, Dassault Aviation, Trialog. Réseau d'excellence sur la conception de systèmes embarqués : Artist2, Plate-forme FP7 (Artemis) (www.cordis.lu/ist/artemis/index.html).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Philips (Pays-bas), Siemens (Allemagne), Continental (Allemagne), Infineon Technologies (Allemagne), Berkeley University (États-Unis), ABB Group (Suisse).

Technologies de l'information et de la communication



7. Composants logiciels

Description

La production de systèmes à logiciel prépondérant de qualité professionnelle doit être accompagnée par un ensemble de méthodes, modèles, outils et architectures permettant d'en maîtriser la conception, l'implémentation, le déploiement et la maintenance dans le respect des spécifications et des délais.

Les facteurs clés de succès passent par :

- la maîtrise de la complexité ;
- l'industrialisation de briques logicielles réutilisables et la capacité d'intégrer ces briques dans des développements spécifiques ;
- l'adaptation en temps réel des logiciels à des plates-formes hétérogènes, à des contextes d'utilisation différents ;
- l'optimisation des tests pendant la conception et après le développement ;
- l'automatisation du processus de déploiement logiciel couvrant toutes les étapes du cycle de vie d'un logiciel : la configuration, l'installation, la mise à jour et la désinstallation.

À l'instar de l'initiative MDA™ (*Model Driven Architecture*), l'ingénierie des modèles propose de capturer la logique d'une application au travers d'une modélisation ce qui facilite les procédures de tests et permet la génération du code. Chaque spécialiste apporte sa plus-value métier et un architecte logiciel met en musique l'ensemble des briques logicielles métiers. La notion d'usine logicielle prend alors tout son sens avec la mise à disposition des outils permettant la modélisation, la vérification de l'application, la génération du code et la réutilisation optimale des briques logicielles. Sur la base de spécifications en langage formel adapté au domaine d'application, un modèle indépendant de la

plate-forme d'exécution est réalisé. Ce modèle peut alors être transformé en un ou plusieurs modèles spécifiques à la plate-forme, testé, ou encore utilisé pour générer automatiquement du code.

La programmation orientée aspect (AOP) est une technique d'ingénierie logicielle qui vise à améliorer le développement des applications complexes pour les systèmes d'information (SI), les sites web (commerce en ligne, sites promotionnels et informatifs...), les logiciels d'infrastructure pour les télécoms ou les logiciels pour le calcul scientifique. Le but de l'AOP est de faciliter la conception de ces logiciels « par morceaux », chaque module se concentrant sur sa finalité, les aspects se chargeant de faire appel aux différents modules techniques en fonction des conditions de leur activation. La conception et le développement de ces fonctionnalités indépendamment les unes des autres est un défi auquel la programmation orientée aspect apporte un certain nombre de réponses qu'il convient de faire progresser et de transférer vers l'industrie.

Ces techniques de génie logiciel s'appuient largement sur la notion de « composants logiciels ». Développé par un éditeur ou accessible librement, un composant est une brique logicielle réutilisable par plusieurs applications. Conceptuellement, un composant correspond à l'expression logicielle des caractéristiques et des comportements d'un objet, d'un service, d'un aspect ou éventuellement d'une application informatique complète. Les composants logiciels tendent à devenir des agents autonomes, capables d'apprendre, de s'organiser, de découvrir les services offerts par les autres composants. L'intérêt de pouvoir se baser sur des briques logicielles existantes pour construire de nou-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies de l'information et de la communication

velles applications informatiques est évident, mais le problème de l'intégration n'est pas évident : il faut notamment s'assurer que le comportement du composant sera conforme à ce que l'application attend. Pour cela, il est nécessaire de développer des méthodes et des outils pour assister le développement et l'intégration de composants : capture des caractéristiques sémantiques, accès à des bases de données de composants documentés, test de conformité et d'intégrité du composant.

Les efforts de recherche et de transfert vers l'industrie doivent être poursuivis, notamment dans la définition de nouveaux modèles, de nouvelles architectures, de nouveaux langages, de nouvelles méthodes de preuve, de nouvelles méthodes d'analyse de code.

Enjeux, Impact

La mobilité, la taille et l'hétérogénéité des réseaux, la mise en commun des ressources réparties, la demande croissante en matière de services sont autant de facteurs qui poussent les méthodes de développement de systèmes d'information, et de logiciel en général, à évoluer, tout en conservant un niveau de qualité élevé.

La fiabilité des logiciels, que ce soit pour des applications critiques ou non, est un enjeu majeur pour la société de l'information et de la communication. Le plus haut niveau de fiabilité ne pourra être atteint qu'à la condition d'une maîtrise de celle-ci à tous les stades du développement logiciel.

Des efforts importants de normalisation au niveau mondial ont été réalisés au cours de ces dernières années, particulièrement sur la base d'UML pour la modélisation et de XML pour la description, rendant possibles les applications actuelles. La seule normalisation n'est cependant pas suffisante. Elle doit s'accompagner de politiques de transparence sur certaines parties de code devant servir d'interface (*Open Source*). En particulier, l'indépendance des applications vis-à-vis des composants logiciels, et des éditeurs de ces derniers, est un enjeu majeur pour la pérennité des développements et peut nécessiter, dans certaines circonstances, le recours à des tiers de confiance.

L'industrialisation des briques logicielles peut conduire à des bouleversements des

modèles économiques. Les problématiques (sûreté de fonctionnement, qualité de service...) du développement logiciel sont généralement transverses à plusieurs domaines d'application, ce qui permet de mutualiser les développements qui seront ensuite adaptés pour réaliser des solutions spécifiques à chaque métier ou domaine. De nouveaux marchés de fournisseurs de composants logiciels sont en train de s'ouvrir et sont largement accessibles à de nouveaux acteurs, notamment parmi les jeunes entreprises. Il sera nécessaire, pour le développement de ces marchés, qu'un cadre pour la certification des briques logicielles réutilisables soit établi. Par sa forte culture logicielle, la France a des atouts non négligeables dans ce domaine.

Marché

Les composants logiciels concernent tous les secteurs d'activités, et particulièrement les secteurs consommateurs en matière de fonctions logicielles.

Les premiers métiers concernés par ces technologies sont les éditeurs de logiciels et les SSII : selon le Syntec Informatique, le chiffre d'affaires cumulé des acteurs du secteur français des logiciels et des services informatiques devrait croître de 6 à 7 % en 2005, pour atteindre environ 31,5 Md€.

La certification des composants logiciels est un enjeu central dans le développement de l'économie autour du logiciel libre. Ce secteur devrait progresser en moyenne de 41,2 % pour atteindre un volume de marché en France de l'ordre de 580 M€ en 2008 (source PAC).

Les composants logiciels et la conception orientée par les modèles concernent aussi les métiers du logiciel embarqué, les fabricants de l'électronique et les intégrateurs.

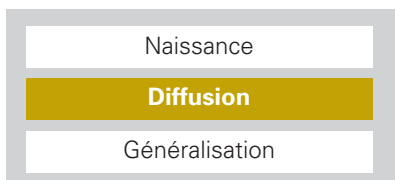
Acteurs

■ Disciplines scientifiques : informatique, électronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : télécommunications, informatique, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), System@tic (Île-de-

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies de l'information et de la communication

France), Loisirs numériques (Rhône-Alpes),

■ Liens avec (technologies) : outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information ; ingénierie des systèmes embarqués ; virtualisation des réseaux ; sécurisation des transactions électroniques et des contenus ; gestion et diffusion des contenus numériques ; technologies du web sémantique ; interfaces humain-machine ; modélisation, simulation, calcul ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; méthodes et outils de coconception ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : ObjectWeb,

Caroll (Thales, Inria, CEA), RNTL, RNRT. Le projet Ecots (www.ecots.org) réalisé dans le cadre du RNTL propose une base de données de description sur les composants logiciels et leurs éditeurs.

Industriels : Ilog, Dassault Systèmes, Business Object, Lectra Systemes, CCMX, Cegid, GL Trade, Cap gemini, Bull Services, Unilog, Steria, Thales, etc.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Mitre Corporation (États-Unis), IBM (États-Unis), Sun (États-Unis), Microsoft (États-Unis), Borland (États-Unis), Computer Associates (États-Unis), Ericsson Utvecklings (Suède), Fujitsu Limited (Japon).

Technologies de l'information et de la communication



8. Infrastructures et technologies pour réseaux de communication « diffus »

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Pour satisfaire les besoins en matière de connexion permanente à débit adapté aux usages, en tous lieux et à faible coût, les réseaux doivent devenir flexibles : cette flexibilité passe, entre autres, par l'adaptation à la mobilité des utilisateurs et à celle des objets communicants.

L'arrivée de connexions sans fil proposant des débits exploitables est un fait majeur de ces dernières années. Plusieurs technologies cohabitent ou sont amenées à cohabiter, les unes venant de la téléphonie (GSM, UMTS 3G, 3.5G, 4G), les autres des réseaux informatiques (bluetooth, ZigBee, WiFi, WiMax, MBWA, WWan) ou de la diffusion (DVH-B, ISDB, S-DMB), chacune possédant des caractéristiques (complémentaires) propres héritées de leur passé (optimisation pour la voix, pour le transport de données), de leurs capacités (portée, débit, consommation, sensibilité au climat, etc.) ou de leur mode de diffusion (diffusion point à point, diffusion vers un grand nombre d'utilisateurs).

Leur mise en cohérence au bénéfice d'une meilleure continuité de la connexion passe par des efforts de normalisation, l'équipement en matière d'infrastructures, mais aussi la mise au point de technologies permettant de les interconnecter.

Une des technologies actuellement la plus développée est la technologie « Mesh ». Issue de la recherche militaire, la technologie Mesh permet aux équipements sans fil de se connecter de proche en proche, d'une façon dynamique et instantanée, sans hiérarchie centrale, formant ainsi une structure en forme de filet (d'où son nom « Mesh »). C'est une technologie dite *ad hoc* car les terminaux se connectent directement entre eux en l'absence d'infrastructure. Un avantage

considérable des technologies *ad hoc* est de permettre la connexion et la déconnexion de nouveaux relais sans recourir à la configuration manuelle et fastidieuse du réseau. Il en est de même lors de l'altération d'un lien sans fil ou de l'ajout de nouvelles passerelles d'accès à l'infrastructure filaire. C'est une technologie de rupture comparée aux solutions centralisées classiques sans fil avec station de base.

Le complément naturel des réseaux de communication diffus est l'informatique contextuelle, principe basé sur la détection automatique de la situation de l'utilisateur permettant d'adapter les services proposés. Les objectifs recherchés sont de personnaliser le service et de diminuer les interactions entre l'utilisateur et la machine.

Enfin, il faut noter l'attrait croissant que suscitent les technologies de transmission à courte distance, telles que la RFID, lesquelles, couplées à des technologies comme le WiFi, peuvent assurer une connectivité permanente des machines communicantes, notamment dans l'entreprise ou dans l'environnement domestique.

Enjeux, Impact

L'enjeu des réseaux de communication diffus est de répondre à la demande en matière de connectivité permanente, en situation de mobilité. Un enjeu majeur est la réduction des coûts, la tendance du *low-cost* en matière de télécommunications et de services étant déjà largement amorcée et supportée par la baisse croissante des prix des semi-conducteurs.

Sur le plan technologique, la normalisation jouera un rôle important pour permettre à plusieurs standards de cohabiter. L'Inria a, par exemple, développé le protocole Mesh

Technologies de l'information et de la communication

OLSR (*Optimized Link State Routing* - standard international - RFC 3626) dans le cadre ouvert de l'IETF (*Internet Engineering Task Force*). OLSR est déjà utilisé par la Délégation générale pour l'armement (DGA) en France et par l'armée américaine.

En ce qui concerne la diffusion de contenus audiovisuels à destination des équipements portables et nomades (téléphones mobiles, PDA, ordinateurs portables, etc.), l'ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) a sélectionné, en novembre 2004, le DVB-H.

On ne peut pas parler de réseaux de communication diffus sans parler des craintes qu'ils engendrent au niveau de l'acceptabilité sociétale et comportementale : intrusion de la fonction de communication permanente, capacité à interagir en situation de mobilité, surveillance constante, etc.

Marché

Les réseaux de communication diffus rendent possible un grand nombre d'applications, la plupart restant d'ailleurs à inventer, telles que :

- les services d'information continue ;
- les télécommunications interpersonnelles ;
- les applications mobiles pour les entreprises ;
- la télévision mobile ;
- le média à la demande.

Le marché final est difficile à chiffrer dans la mesure où il est relativement nouveau. À titre de comparaison, le marché de la 3G devrait concerner 164 millions d'appareils mobiles en 2007.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : physique théorique, optique, informatique, traitement du signal, électronique, mathématiques et leurs applications, géographie et aménagement.

■ Compétences technologiques : télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, environnement-pollution, transports, spatial-armement, consommation des ménages, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Elopsys (Limousin - Midi-Pyrénées), Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre).

■ Liens avec (technologies) : gestion de la microénergie ; stockage de l'information numérique ; processeurs et systèmes ; RFID et cartes sans contact ; ingénierie des systèmes embarqués ; virtualisation des réseaux ; sécurisation des transactions électroniques et des contenus ; technologies du web sémantique ; gestion et diffusion des contenus numériques ; interfaces humain-machine ; affichage nomade.

■ Principaux acteurs français

Centre de compétences : Inria (Rocquencourt), LIP6 (Université Paris 6), LRI (Orsay), Inria Futur (Saclay), France Télécom R&D (Grenoble), LIFL (Lille).

Industriels : France Télécom, Inventel, Luceor, Ozone.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Nortel (Canada), MIT (États-Unis), AT&T (États-Unis), NTT Docomo (Japon), Microsoft (États-Unis), Philips (Pays-Bas).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de composants électroniques ; services de transports ; activités financières ; activités immobilières ; postes et télécommunications ; services informatiques ; services aux entreprises ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques ; éducation ; santé, action sociale ; administration.

Technologies de l'information et de la communication



9. Virtualisation des réseaux

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La virtualisation des réseaux consiste à masquer l'hétérogénéité des infrastructures réseaux (type de transmission, protocoles, etc.) aux yeux de l'opérateur (télécoms), du fournisseur de services (de TV numérique haute définition) et, au final, du consommateur.

Les réseaux de communication, et particulièrement les réseaux mobiles, se caractérisent par une grande hétérogénéité, à la fois au niveau des couches « basses » (infrastructures, accès divers) et « hautes » (incompatibilité des différents formats de données, des logiciels applicatifs). Pour que la transaction électronique de bout en bout soit possible, les réseaux doivent pourtant :

- être interconnectés : fils de cuivre, hertzien, fibre optique, câble, courant porteur, etc. ;
- interopérer : assurer le transport, la mise en commun de ressources ;
- échanger : communiquer et partager des données, s'informer sur l'état et les capacités du réseau, les services disponibles, etc., pour s'auto-organiser, rendre les services en fonction du contexte.

La virtualisation complète des réseaux demande la levée de plusieurs verrous, à chaque niveau concerné (couche physique, couche transport, couche application), y compris au niveau des terminaux.

Sur le plan de la transmission physique, il s'agit d'harmoniser les spectres d'interface (radio, filaire, optiques), de faciliter la lisibilité des informations transportées (conversion analogique-numérique, filtrage), de développer les approches reconfigurables (radio logicielle, composant large bande).

À l'autre extrémité, les objets récepteurs et les applications (interfaces, authentification,

etc.) devront être capables de s'adapter à plusieurs standards, à différents utilisateurs, à différents contextes, sans discontinuité. L'environnement quotidien (maison, transports, etc.) devra fournir les moyens d'assurer la continuité des services (par exemple, continuer à visionner un film sur différents supports dans la maison).

Entre le réseau et le récepteur, l'interopérabilité repose sur la définition de nouvelles architectures, de nouveaux modes de transmission (multicast, ciblée, grande diffusion), des techniques de routage intelligent et dynamique, d'accès aux données réparties (SAN - *Storage Area Network*) capables de prendre en compte les évolutions matérielles ou physiques, les environnements totalement distribués.

Enfin, la continuité des services et le partage des informations sont possibles par le biais de logiciels intermédiaires (entre le transport et l'application), permettant de découvrir les services disponibles, d'adapter les contenus ou d'assurer la traçabilité des transactions (SLA...), condition indispensable pour acquérir la confiance des utilisateurs, des fournisseurs de services (et de contenu), des opérateurs et pour permettre la facturation des services.

Enjeux, Impact

Au cours de la dernière année, l'accélération des offres de voix sur IP a bouleversé le paysage des télécommunications et a probablement ouvert le chemin pour d'autres applications convergentes (voix, données, vidéo, mobile, fixe). Si l'arrivée du protocole IPV6 (permettant d'affecter une adresse IP à chaque objet communicant et offrant des garanties accrues en matière de sécurité) sera certainement un facteur d'uniformisation et

Technologies de l'information et de la communication

permettra d'installer le protocole Internet (IP) comme standard, le chemin est encore long pour arriver à une convergence totale permettant de supporter des services performants (et notamment multimédias).

L'impact majeur de la virtualisation des réseaux est de rendre possible la définition de nouvelles offres de services à valeur ajoutée (*bundles*) pour les entreprises et les particuliers. On peut, en particulier, envisager une généralisation d'acteurs tels que les MVNO (*Mobile Virtual Network Operators* - opérateurs virtuels) sur le marché du mobile, qui loueront des capacités réseau aux détenteurs de licences ou d'infrastructures. De tels modèles économiques reposent sur la capacité de la technologie à assurer la traçabilité des transactions.

Les aspects normatifs et réglementaires interviennent à plusieurs niveaux : réglementation des télécommunications, gestion du spectre des interfaces, allocation des fréquences, normalisation des données, accès aux informations constructeurs (caractéristiques des équipements terminaux), etc.

La virtualisation des réseaux concerne un grand nombre d'acteurs dont les opérateurs, hébergeurs et fournisseurs d'accès, les équipementiers de réseau et d'interconnexion, les intégrateurs, SSII, éditeurs de logiciels, les offreurs de services ou de contenu, les fabricants d'électronique grand public.

Marché

Le marché final (du point de vue des applications rendues possibles par la virtualisation des réseaux) est le marché des services : télécommunications, audiovisuel, commerce en ligne, services de données aux entreprises, etc. Ce marché est colossal, les services de télécommunication, à eux seuls, représentaient, au niveau mondial, plus de 1 025 Md€ en 2004. La virtualisation des réseaux ouvre la voie à de nouvelles offres en matière de plates-formes logicielles (ou intergiciels), telles que :

- les plates-formes d'intermédiation de services permettant la refacturation (*billing*) ;

- les plates-formes pour l'entreprise mobile (*Rich Internet Applications*) ;
- les grilles informatiques : grilles de données, grilles de calcul, grilles de services ;
- les plates-formes pour la convergence fixe-mobilité.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : optique, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : composants électriques, audiovisuel, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique.

■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), System@tic (Île-de-France), Minalogic (Rhône-Alpes), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : processeurs et systèmes ; outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information ; ingénierie des systèmes embarqués ; composants logiciels ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus ; sécurisation des transactions électroniques et des contenus ; acquisition et traitement de données ; gestion et diffusion des contenus numériques ; technologies du web sémantique ; affichage nomade ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inria, Alliance TICS, France Télécom R&D, INT, ENST Bretagne, Telecom Valley (Sophia-Antipolis).

Industriels : France Télécom, SFR, Net Centrex, CVF, 6WIND, ScalAgent, Alcatel, Thomson, Wengo, etc.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Groove Network (États-Unis), Cisco (États-Unis), IBM (États-Unis), E-Mule project (États-Unis), Skype (États-Unis), British Telecom (Royaume-Uni), Nortel (Canada).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de composants électroniques ; travaux publics ; services de transports ; activités financières ; activités immobilières ; postes et télécommunications ; services informatiques ; services aux entreprises ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques ; éducation ; santé, action sociale ; administration.

Technologies de l'information et de la communication



10. Sécurisation des transactions électroniques et des contenus

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les technologies pour la sécurisation des transactions électroniques visent à prévenir, détecter et limiter les attaques malveillantes à l'encontre des systèmes, des contenus, des services et des personnes.

La sécurisation des transactions électroniques concerne plusieurs axes de développement technologiques, qui peuvent être combinés. Les techniques de bases sont :

- l'identification-authentification par mot de passe (à usage unique ou pas) ; la biométrie ; la carte à puce ou clé USB, la combinaison de ces technologies ;
- la signature électronique ;
- le chiffrement ;
- l'effacement sûr ;
- la détection d'intrusion (IDS) ;
- le filtrage ;
- la faradisation.

Ces technologies de base sont intégrées au sein de produits de sécurité élaborés, offrant des services de haut niveau :

- le contrôle d'accès et d'identité (tel que le *Single Sign-on*⁽¹⁾) ;
- la sécurisation des infrastructures de transport (boîtiers de chiffrement, VPN - *Virtual Private Network*) des équipements et des sites (firewall, antivirus, antisipam) ;
- la certification électronique (infrastructure de gestion de clé, horodatage, signature électronique) ;
- la sécurisation des contenus et des droits numériques (DRM - *Digital Rights Management*, gestion des droits numériques).

(1) L'objet du *Single Sign-on* (SSO) est de centraliser l'authentification afin de permettre à l'utilisateur d'accéder à toutes les ressources (machines, systèmes, réseaux) auxquelles il est autorisé d'accéder, en s'étant identifié une seule fois sur le réseau. L'objectif du SSO est de propager l'information d'authentification aux différents services du réseau, voire aux autres réseaux, et d'éviter à l'utilisateur de multiples identifications par mot de passe.

Le développement croissant de l'ouverture des réseaux basés sur des technologies filaires, non filaires et des architectures distribuées actives (reconfigurables), la prolifération des terminaux multiplie les points de vulnérabilité des infrastructures : usage frauduleux du terminal, attaque des nœuds de routage, interception des données, etc. En particulier, les réseaux non filaires, sensibles aux interceptions, demandent des réponses technologiques (chiffrement, protocoles cryptés) permettant de réduire les risques d'écoute tout en garantissant un transport efficace.

La protection des systèmes d'information d'entreprises repose largement sur l'utilisation conjointe d'antivirus, de pare-feu ou systèmes de détections d'intrusion lesquels, mis en œuvre dans un cadre général de bonnes pratiques en matière de sécurité, permettent de réduire le nombre d'attaques ou d'intrusions. Mais la mise en place de pare-feu passe par la maîtrise de méthodes d'analyse permettant de les identifier. De nouvelles stratégies consistant à créer des leurres permettant d'attirer les attaques sont actuellement en cours de développement. La mise à jour de ces produits repose sur une bonne connaissance des systèmes d'exploitation les plus courants et sur la surveillance constante du réseau Internet opérée par les centres d'alerte (CERT - *Computer Emergency Response Team*) et permettant de détecter rapidement les nouvelles attaques. Une clé de la sécurisation des transactions électroniques, du terminal au contenu, passe par la maîtrise de l'identification et de l'authentification (preuve de l'identification) des utilisateurs, mais aussi des applications, des documents et des transactions elles-mêmes. La vérification de l'identité et la preuve de l'identité reposent sur un ensem-

Technologies de l'information et de la communication

ble de technologies parmi lesquelles la biométrie, le tatouage, les signatures numériques. Elle nécessite aussi le déploiement de systèmes d'informations permettant de vérifier des droits d'accès qui peuvent être variables dans le temps, l'espace ou le contexte (accès à des zones de sécurité, paiement des droits d'accès aux contenus, etc.) et offrant des garanties en matière de protection de la vie privée.

La biométrie consiste à exploiter les informations dont la personne est naturellement porteuse (caractéristiques physiques, mouvement). La difficulté de tels systèmes repose sur le choix pertinent de caractéristiques discriminantes et leur capture ainsi que sur l'architecture des banques de données pour l'étalonnage des algorithmes de reconnaissance.

Le tatouage de documents consiste à introduire dans le document des informations imperceptibles et protégées permettant de déterminer la propriété, les permissions d'usage ou de modification du contenu. Les technologies varient selon le caractère du contenu (texte, images, vidéos, programmes informatiques) : on peut citer le *watermarking*, la stéganographie.

La signature numérique doit permettre de garantir que le signataire a visé le document ou l'information. Elle ne doit pas être falsifiable, être inaltérable et non reproductible par un tiers (personne, application). Elle repose sur des technologies de cryptographie asymétrique (clé publique, clé privée). Les progrès attendus en matière de cryptographie reposent sur la définition de mécanismes moins coûteux en matière de calcul ou le chiffrement de flux d'informations pour remplacer les actuels chiffrements de blocs d'information. À plus long terme, des applications basées sur des méthodes de cryptographie quantique sont attendues.

Enfin, la recherche d'efficacité en matière de sécurité des transactions électroniques passe, aussi, par la définition de métriques permettant d'apprécier les niveaux de risques et de protection.

Enjeux, Impact

Un contrôle en continu de l'intégrité et de l'accès (usage, identité du destinataire, émetteur, propriétaire) à un contenu ou à un

service constitue la pierre angulaire de la traçabilité des transactions. Il permet :

- la protection des intérêts supérieurs de l'État et des intérêts commerciaux des entreprises. Pour les entreprises, il s'agit de réduire le coût induit par les attaques (perte de temps, perte d'informations, espionnage, etc.) ;
- le développement du commerce et des échanges électroniques. La traçabilité est en effet indispensable à la facturation des services et la sécurité contribue à la confiance dans l'économie numérique, qui est une condition indispensable du développement économique ;
- la protection de la vie privée. Les données personnelles véhiculées dans les systèmes d'information sont en effet des données sensibles à protéger.

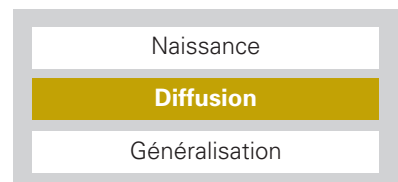
Il faut noter que le cadre législatif de la signature électronique, de la protection des données personnelles ou de la gestion des droits numériques, ainsi que les normes relatives aux processus d'authentification ou aux algorithmes de cryptographie, ont un impact important sur ce domaine. Élaboré, pour l'essentiel, au niveau européen, sa transposition dans le cadre national doit être faite en veillant à ne pas générer d'effets pervers susceptibles de défavoriser les entreprises françaises. Il faut aussi veiller en permanence à rechercher un équilibre continu entre droit commercial et protection des libertés individuelles, droit de propriété industrielle et principe d'interopérabilité, lutte contre la grande criminalité et respect de l'espace public anonyme et de la vie privée.

La sécurité des transactions électroniques est aussi fortement liée à des initiatives de normalisation, comme par exemple celle du consortium Liberty alliance qui vise à définir et à promouvoir une architecture technologique permettant le *Single Sign-on* : il s'agit de permettre à un utilisateur de s'identifier de manière unique quels que soient l'application ou le service auquel il souhaite accéder. Cette initiative se heurte notamment à la disparité en matière de droit d'usage des données à caractère privé ou personnel selon les pays d'application.

Marché

Le marché mondial de la sécurité des systè-

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application

Fabrication de composants électroniques ; commerce de gros, intermédiaires ; services de transports ; activités financières ; activités immobilières ; postes et télécommunications ; services informatiques ; services aux entreprises ; hôtels et restaurants ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques ; éducation ; santé, action sociale ; administration.

Technologies de l'information et de la communication

mes d'information est estimé à 50 Md€. Il est en croissance forte, d'environ 15 % par an. Mais au-delà de ce marché propre, la prise en compte de la sécurité dans toutes les technologies de l'information permet d'apporter une valeur ajoutée importante à tous ces produits.

Il faut par ailleurs noter que le déploiement de ces solutions technologiques complexes et interdépendantes ne peut pas se faire sans une expertise poussée. Le maintien en état et le fonctionnement efficace des dispositifs mobilisent aussi des ressources et des compétences spécifiques. Le marché des produits de sécurité informatique se double donc d'un marché de services extrêmement dynamique.

La sécurité des transactions électroniques concerne les marchés du matériel (pare-feu, routeurs, détecteurs d'intrusion, cartes à puces, etc.) et du logiciel (antivirus, antis-pams, solutions complètes de contrôle du courrier électronique, etc.), mais aussi les intégrateurs et les spécialistes de la stratégie en matière de sécurité informatique.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : informatique, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, sciences du langage, psychologie, sociologie, droit et sciences politiques, économie et gestion.

■ Compétences technologiques : télécommunications, informatique, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia

et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), Loisirs numériques (Rhône-Alpes), Gestion des risques et vulnérabilités des territoires (Paca, Languedoc-Roussillon), Elopsys (Limousin - Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus ; virtualisation des réseaux ; gestion et diffusion des contenus numériques ; ingénierie des systèmes complexes ; RFID et cartes sans contact ; traçabilité.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inria, DGA, CEA-Leti, LAAS (Toulouse), LIFL (Lille), CNRS.

Industriels : Thales, Sagem, Evidian (Bull), EADS, Axalto, Gemplus, Oberthur CS, Devoteam (Apogée communications), Ares, Transpac (France Télécom), Risc Group, Arkoon, Netasq, IdealX, Keynectis, Dictao, Criston, Sophos.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Cisco (États-Unis), Juniper (États-Unis), Checkpoint (États-Unis), Symantec (États-Unis), McAfee (États-Unis), Giesecke & Devrient (Allemagne), Verisign (États-Unis), Bioscrypt (États-Unis), Iridian (États-Unis), Voicevault (Royaume-Uni), Tumbleweed (États-Unis), RSA Security (États-Unis), Safenet (États-Unis), Aladdin (États-Unis, Israël), National Science Foundation - Team for Research in Ubiquitous Secure Technology (États-Unis), etc.

Technologies de l'information et de la communication



11. Acquisition et traitement de données

Description

L'acquisition et le traitement de données fait référence à un ensemble de dispositifs et de technologies permettant de capturer des données (signal, texte, images, son, etc.) et de les transformer en contenus numériques exploitables par des applications en temps réel (applications embarquées) ou en temps différé.

La démarche d'acquisition et de traitement de données requiert une forte interaction entre les informations à capturer et leur environnement extérieur (contexte de capture ou d'usage des données, utilisateur, autres données, etc.) et concerne plusieurs niveaux.

- La capture du signal ou de l'information à sa source. Avant d'être traitée, l'information doit être capturée objectivement à l'aide de dispositifs matériels qui peuvent être, selon le contexte et l'application, par exemple, un capteur de position (GPS, senseur de proximité), un capteur de température, un clavier d'ordinateur, une souris, une caméra, un scanner de documents papier, un dispositif multimodal de reconnaissance vocale, un stylo électronique, etc. L'enjeu est à présent d'inventer et de développer de nouveaux équipements (voir aussi la fiche Capteurs intelligents et traitement du signal) permettant de capturer la complexité de l'information et de son environnement, tout en restant adapté aux contraintes d'usage (mobilité, conditions extrêmes, sécurité, etc.).
- La capture des informations relatives au contexte d'utilisation. Les données relatives à l'information ou au signal pourront être plus facilement traitées, interprétées ou utilisées si elles sont mises en corrélation avec leur contexte de capture (localisation géographique, intensité lumineuse, heure de capture)

ou d'utilisation (profil de l'utilisateur, équipement utilisé pour l'affichage, situation d'utilisation). Cela requiert de capturer et de représenter des informations (objectives ou subjectives) à propos des données : on parle, alors, de métadonnées.

- L'analyse et le filtrage des données. Une fois capturées, les données sont transformées sous forme numérique par un traitement (traitement du signal, numérisation de documents, etc.) et sont analysées (analyse d'images, reconnaissance de formes, reconnaissance de la voix, etc.). Un enjeu fort pour permettre, en particulier, l'interprétation temps-réel de données (à partir d'images radar ou de vidéos pour des applications destinées à la sécurité par exemple) est le développement d'algorithmes capables d'être exécutés dans des conditions de ressources contraintes (puissance de calcul limitée, économie d'énergie, etc.). Pour certaines applications, le traitement de ces données requiert l'accès à un ensemble plus vaste d'informations (banque de données) qui ne sont pas « localement disponibles » et doivent être consultées par l'intermédiaire d'un moyen de communication (réseau Internet, réseau spécialisé d'entreprise, réseau militaire, etc.).

- La transformation et la représentation du contenu enrichi. Les contenus numériques capturés et/ou transformés proviennent donc de différentes sources (capteurs de position, données entrées au clavier, images, etc.) et doivent être agrégés pour être utilisés, transportés ou conservés. On peut citer trois grands types de technologies : les techniques de compression permettent de réduire la taille des données et d'en faciliter le transport ou le stockage ; la fusion de données permet de représenter un contenu enri-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies de l'information et de la communication

chi par des informations complémentaires (image recomposée à partir de plusieurs clichés) ; l'agrégation de contenus permet de composer des documents numériques sur la base d'un ensemble de données de source et de nature différentes (fichier MPGE4).

Plus généralement, il est nécessaire de développer des outils permettant de réduire le « gap » sémantique entre les données objectives capturées et le sens dont elles sont porteuses, y compris des outils permettant de capitaliser les informations sémantiques à partir de l'expérience humaine : méthodes d'apprentissage, systèmes automatiques ou semi-automatiques d'aide à la décision, d'interprétation sémantique. Il s'agit aussi d'inventer de nouvelles façons de visualiser cette information enrichie (superposition de données sur une image, réalité augmentée, etc.).

Enjeux, Impact

L'acquisition et le traitement de données sont une technologie centrale dans les dispositifs liés à la sécurité tels que le contrôle des personnes et des mouvements, l'observation des phénomènes naturels (tempêtes, marées, etc.), les avions, les aides à la conduite automobile.

La généralisation d'objets et de services mettant en œuvre des technologies d'acquisition de données peut apporter une réponse en matière de services à la personne, en particulier dans le domaine de la surveillance à domicile des personnes âgées.

Le défi général de l'acquisition de données pour les années à venir est de s'adapter à la demande croissante en matière de consommation de contenus numériques, d'intégrer les nouvelles technologies existantes par ailleurs (capteurs de position peu coûteux précis à 10 m) et plus généralement d'exploiter les données fournies par le contexte d'intelligence ambiante, pour proposer des contenus plus riches et de nouveaux services.

Marché

L'acquisition de données est à la base de nombreuses applications qui devrait se généraliser dans les années à venir :

- les robots intelligents et le service à la personne : assistants intelligents pour l'analyse

des données hétérogènes collectées par des capteurs au domicile afin de détecter, voire prévenir des situations inquiétantes ;

- les équipements électroniques grand public et services associés : appareil photo numérique intelligent qui adapte les réglages au contexte, insère des métadonnées dans les fichiers ; caméras haute performance ; interfaces adaptées aux handicaps ; téléphones géolocalisés, etc. ;

- la surveillance industrielle : la surveillance des installations et de leur fonctionnement, le traitement automatique par vision artificielle, etc. ;

- l'automobile intelligente, munie de capteurs et de réseaux de communication pour l'assistance à la conduite ;

- les applications de surveillance civile ou militaire.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : neurosciences, physique théorique, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, optique, mathématiques et leurs applications, sciences du langage, psychologie, sociologie.

- Compétences technologiques : audiovisuel, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, procédés techniques, transports, spatial - armement.

- Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Mer, sécurité et sûreté (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Elopsys (Limousin - Midi-Pyrénées), Gestion des risques et vulnérabilités des territoires, Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Route des lasers (Aquitaine).

- Liens avec (technologies) : processeurs et systèmes ; outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus ; gestion et diffusion des contenus numériques ; technologies du web sémantique ; interfaces humain-machine ; modélisation, simulation, calcul ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; affichage nomade ; capteurs intelligents et traitement du signal ; ingénierie des systèmes embarqués.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; fabrication de composants électroniques ; services de transports ; services informatiques ; services aux entreprises ; recherche et développement ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques ; santé, action sociale.
--

Technologies de l'information et de la communication

■ Principaux acteurs français

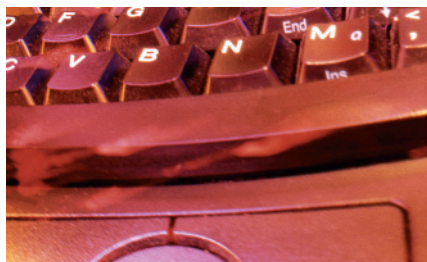
Centres de compétences : projet Artemis (INT/GET), CNRS-GDR ISIS, Ifremer, Optics Valley.

Industriels : Omega, Apem, ITT France, Fimor, Valéo, EADS, Thales, Aréva, Schneider, Vecsys, etc.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Agilent Technologies (États-Unis), National

Instrument (États-Unis), Readsoft (Suède), Philips Digital Systems (Pays-Bas), Handres+Hauser (Suisse), Acqiris (Suisse), Dewetron (Autriche), Sony (Japon), Matrox (Canada), etc.

Technologies de l'information et de la communication



12. Gestion et diffusion des contenus numériques

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Le gestion et la diffusion de contenus numériques (textes, photos, documents composites, fichiers audio ou vidéo, logiciels, etc.) font référence à un ensemble de technologies permettant d'organiser, d'accéder et d'acheminer les contenus tout en garantissant leur intégrité et en gérant les contraintes liées aux droits de diffusion.

La gestion et la diffusion de contenus numériques reposent sur la maîtrise de technologies charnières, parmi lesquelles :

- les bases de données, générales ou spécialisées pour un type de contenu spécifique (bases de données vidéo par exemple) ;
- les systèmes d'indexation automatique de contenu, particulièrement de contenus multimédias ;
- la multireprésentation des données permettant d'adapter les contenus ou de les composer à la volée en fonction de la capacité d'affichage des supports (dans le cas d'applications mobiles), des droits d'accès, de la demande de l'utilisateur ou de son contexte d'usage ;
- les grilles de données et autres architectures permettant le stockage sécurisé et l'accès à des contenus répartis sur un réseau ;
- les serveurs de contenu puissants capables de prendre en compte un très grand nombre de transactions ou d'explorer de très grandes bases de données ;
- les moteurs de recherche et les interfaces de navigation ;
- les systèmes de contrôle des droits d'usage, de diffusion et de l'intégrité des contenus.

L'accroissement constant de la quantité de contenus numériques disponibles impose des techniques d'indexation et de recherche sophistiquées, capables d'exploiter le conte-

nu lui-même, mais aussi tous les éléments de son contexte (métadonnées, profil de l'utilisateur, localisation géographique, retour sur expérience) pour proposer une organisation des données permettant un accès ultérieur rapide et pertinent.

Les technologies permettant de traiter automatiquement et intelligemment les données pour isoler l'information pertinente ou extraire du « sens » sont la clé de voûte des systèmes de gestion des contenus de demain. Sont concernés, entre autres :

- la traduction automatique de documents ;
- le raisonnement sur les données : à base logique, de règles d'inférences, supporté par des langages de type LISP (pour *list processing*) ;
- l'exploration : combinatoire, théorie de graphes, *topics maps* ;
- l'extraction : le *datamining*, les réseaux baysiens, les méthodes probabilistes et multidimensionnelles.

Les architectures de bases de données elles-mêmes doivent évoluer de manière à prendre en compte le manque de structuration des contenus (bases de données objet), la quantité de contenus, leur hétérogénéité (multiples formats de fichiers), leurs spécificités (bases de données spatiales), leur répartition sur des réseaux, les accès concurrents, la multiplicité des points de vue et les besoins en matière de stockage pérenne.

L'usage ultime étant l'accès rapide au contenu désiré par l'utilisateur, les problématiques touchant la gestion des contenus sont étroitement liées à l'ergonomie des interfaces d'accès qui doivent être intuitives et permettre d'aller droit à l'information avec un minimum d'interactions. Les évolutions dans ce domaine passent donc, aussi, par une meilleure connaissance du mode de repré-

Technologies de l'information et de la communication

sensation mentale dont l'utilisateur fera montre en situation de recherche d'un contenu. L'interactivité passe aussi par la rapidité des échanges : les réseaux de distribution des contenus numériques (CDN - *Content Delivery Network*) nécessitent la mise au point de serveurs intermédiaires ou serveurs caches permettant la décentralisation de la gestion des flux et l'interfaçage optimisé des contenus stockés et des requêtes des utilisateurs.

Enfin l'accès aux contenus impose une stricte gestion des droits d'accès, que ce soit pour les contenus professionnels soumis à des droits d'auteurs, des informations d'entreprise soumises à confidentialité ou des données personnelles posant des challenges en matière de respect de la vie privée. Les techniques de DRM (*Digital Rights Management*) sont centrales.

Enjeux, Impact

À l'image du succès de Google, la valeur ajoutée sur le marché des services et contenus se déporte sur les détenteurs de technologies rendant l'accès possible. L'enjeu pour les industries des TIC, mais aussi pour les pays, est donc de maîtriser ces technologies charnières pour la circulation des contenus, et de fait, des informations.

L'autre enjeu majeur de la gestion de la diffusion des contenus est de répondre à la demande croissante des utilisateurs en matière d'accès à des contenus numériques, de l'usage domestique à l'usage professionnel. Il est aussi de permettre le développement et le contrôle de nouveaux modes de rémunération pour les détenteurs de contenus qui voient leur mode de diffusion bouleversé.

Que ce soit pour le DRM, la gestion de contenus ou sa diffusion, les problématiques de standardisation sont centrales puisque les technologies en cours de développement devront être en mesure de les exploiter. On peut citer, entre autres :

- le codage et la compression de données multimédias : MPEG-4 (vidéo), MPEG-7 (contenus multimédias), MPEG-21 (tout type de contenus) ;
- l'authentification unique : *Single Sign-on* (SSO) de Liberty Alliance, en réponse à l'approche *passport* de Microsoft ;

- les architectures de grilles : Globus.

À moyen ou long terme, de nouvelles technologies, de nouvelles offres de contenus, de nouveaux comportements utilisateurs peuvent bouleverser le paysage actuel des acteurs sur le marché de la gestion de contenus numériques.

Marché

La gestion de la diffusion des contenus numériques concerne, en premier lieu, le marché des services et contenus grand public qui poursuit sa progression vers le « tout en ligne ». Ces technologies sont aussi centrales dans le domaine des applications et services d'entreprise, marché sur lequel on peut noter une forte concentration de gros acteurs internationaux.

Enfin, de nombreux marchés pour des contenus spécifiques (photos, vidéos personnelles, banques d'effets spéciaux pour le domaine du jeu vidéo, numérisation des patrimoines nationaux) sont accessibles à de nouvelles entreprises ou à des entreprises de petite taille.

Le chiffre d'affaires du contenu en ligne public atteindra plus de 3 Md€ en 2005 et jusqu'à 16 Md€ en 2008 (source EITO). En l'espace de trois ans, il devrait dépasser celui du contenu pour entreprises.

L'enseignement occupe aussi, aujourd'hui, une place importante en tant que marché avec l'ouverture de plates-formes numériques de ressources et de campus virtuels.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : informatique, mathématiques et leurs applications, sciences du langage, psychologie, sociologie, droit et sciences politiques, économie et gestion.

■ Compétences technologiques : audiovisuel, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, consommation des ménages.

■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Loisirs numériques (Rhône-Alpes), Industries du commerce (Nord-Pas-de-Calais), Gestion des risques et vulnérabilités des territoires (Paca, Langue-doc-Roussillon), Elopsys (Limousin, Midi-Pyrénées).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Édition, imprimerie, reproduction ; commerce de gros, intermédiaires ; commerce de détail, réparations ; services de transports ; activités financières ; activités immobilières ; postes et télécommunications ; services informatiques ; services aux entreprises ; recherche et développement ; hôtels et restaurants ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques ; éducation ; santé, action sociale ; administration.

Technologies de l'information et de la communication

■ Liens avec (technologies) : stockage de l'information numérique ; outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus ; virtualisation des réseaux ; sécurisation des transactions électroniques et des contenus ; acquisition et traitement de données ; technologies du web sémantique ; interfaces humain-machine ; affichage nomade.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Quaero (projet de

moteur de recherche européen), Geste (Groupement des éditeurs de services en ligne).

Industriels : Exalead, Codeva, Ever, Esker, Acanthis, Kartoo, Social Computing, LTU technologies.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Google (États-Unis), IBM (États-Unis), HP (États-Unis), Entrieva (États-Unis), Akamai (États-Unis), Yahoo (États-Unis), Alstavis (États-Unis), Microsoft (États-Unis), Mozilla (États-Unis), Askjeeves (États-Unis).

Technologies de l'information et de la communication



13. Technologies du Web sémantique

Description

En référence au concept introduit en 2001 par Tim Berners-Lee, fondateur du W3C (*World Wide Web Consortium*), les technologies du web sémantique se rapportent à un ensemble de modèles et d'outils permettant aux contenus numériques d'être partagés et utilisés à travers Internet par diverses applications, personnes, entreprises.

La variété des contenus numériques reflète la variété des applications rendues possibles par les réseaux de communication (texte, images, documents multimédias, voix, musiques, programmes informatiques exécutables). Un contenu numérique circule (sur un réseau, entre des applications) sous la forme d'un ou plusieurs fichiers électroniques et la capacité des programmes à « comprendre » ce contenu numérique (pour l'afficher, le traiter, etc.) repose sur la connaissance des modèles utilisés pour la représentation des différents éléments composant ce contenu. Ces modèles sont par essence complexes puisqu'ils doivent permettre la représentation d'une grande variété de contenus, selon plusieurs niveaux d'abstraction : signal, données, information, savoir. Ils doivent, en outre, être suffisamment génériques pour permettre l'interprétation dans différents contextes, l'affichage sur différents supports (comme par exemple l'édition d'un livre à partir d'un texte au format hypertexte, ou l'affichage d'une même vidéo sur un écran de téléphone portable ou sur une télévision haute définition) et autoriser l'échange.

De nombreux modèles ont pu être développés grâce à un effort considérable en matière de normalisation des langages de description de contenus issus de SGML, en particulier ces dernières années le langage XML. Mais le langage n'est pas suffisant pour permettre

de représenter le « sens » des données. Les aspects sémantiques reposent sur l'existence de descriptions plus complexes des relations entre les données (RDF), et de schémas plus compliqués (ontologies) permettant de capturer le domaine concerné par les données (OWL, DAML+OIL). Pour être en mesure d'exploiter pleinement les technologies du web sémantique, plusieurs axes de développement doivent faire l'objet de progrès :

- techniques d'exploration, d'apprentissage, pour le classement des connaissances ;
- développement de modèles, de langages (métadonnées, ontologies) spécifiques à des domaines d'application, à des métiers, à des services, etc. ;
- développement d'outils logiciels pour assister la description des données et des domaines, en particulier pour les documents multimédias (images, vidéos, etc.) ;
- approches pluridisciplinaires (sciences cognitives, psychologie, etc.) pour la représentation linguistique et sémantique ;
- techniques et outils permettant de raisonner sur les modèles ;
- technologies pour la publication et la découverte de services sur la toile ;
- architectures distribuées pour l'échange de données (*peer-to-peer*) ;
- architectures orientées services permettant à différentes applications (à destination de support fixes ou mobiles), connectées par le réseau (Internet), de communiquer et d'interopérer (composition de services).

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Enjeux, Impact

En 2005, l'interopérabilité des réseaux de communication est un état de fait. L'enjeu de l'appropriation et du développement des technologies liées au web sémantique est de

Technologies de l'information et de la communication

permettre aux applications et aux utilisateurs d'être en mesure d'interopérer, de collaborer et d'échanger.

Au-delà de la nécessité réelle de référentiels communs pour faciliter l'échange dans un contexte ubiquitaire, la maîtrise de la représentation des données permet de maîtriser les clés de l'usage. De fait, les initiatives de normalisation se multiplient et sont au cœur de véritables stratégies industrielles dans tous les secteurs compétitifs. Si le langage de description et les schémas de base semblent à présent consensuels (XML, RDF), le développement de schémas et d'outils dépendant du domaine d'application est lui encore bien ouvert.

La notion de web sémantique utilisée ici dépasse largement les seules activités du consortium du même nom, et de nombreux groupes de réflexion ont lancé des initiatives comparables, répondant à des problématiques d'interopérabilité : MPEG⁽²⁾ (depuis MPEG4), Dublin Core⁽³⁾ (bibliothèques numériques) mais aussi Oasis⁽⁴⁾ (*Active Objects, Semantics, Internet and Security - Web services*), Globus⁽⁵⁾ (Grilles), etc.

Cette domination de la politique des standards ouverts ne doit toutefois pas masquer la possibilité de développer des technologies propriétaires qui s'imposeront par leurs qualités intrinsèques, en particulier sur des marchés de niches.

Marché

L'exploitation des technologies du web sémantique est à la base de nombreux types d'applications (dont la plupart restent à inventer) dans la quasi-totalité des domaines pour lesquels l'informatisation a un intérêt. On peut citer quelques exemples significatifs :

(2) Le groupe MPEG a été établi en 1988 dans le but de développer des standards internationaux de compression, décompression, traitement et codage d'images animées et de données audio. Il existe plusieurs standards MPEG.

(3) Norme de description simple des ressources d'information électronique.

(4) L'objectif du projet est de proposer des principes fondamentaux, des techniques et des outils pour la construction, l'analyse, la validation, la vérification et la maintenance de systèmes fiables.

(5) Le projet Globus a été initié par l'université d'Argonne, en Californie, et concerne les grilles de calcul. Destinée principalement aux applications scientifiques, la grille de calcul (grid) est un environnement informatique distribué permettant d'exploiter la puissance et l'espace mémoire disponibles sur des machines réparties dans des entreprises ou des lieux géographiques différents.

- les applications d'entreprises : plates-formes de travail collaboratif, veille économique et concurrentielle, capitalisation de connaissance, mutualisation des ressources (grilles de calcul, de données, de services) ;

- l'e-formation : les technologies du web sémantique et l'ingénierie des ontologies permettront d'accéder au grand nombre de ressources pédagogiques disponibles sur le web ou sur des plates-formes. Dans différents scénarios du e-learning, ces technologies permettront d'aider un enseignant à construire un cours, et à un étudiant de construire un curriculum personnalisé. Ces mêmes acteurs de la formation se verront également faciliter le concept de veille documentaire sur le réseau Internet pour la quête d'une information plus pertinente ;

- l'e-commerce, e-entreprise : personnalisation de la relation client sur la base de l'exploitation de son profil et des services disponibles, agents conversationnels intelligents pour guider l'achat ou le service après-vente, orchestration des processus métiers (*Business Process Management, Workflows*), etc. ;

- l'e-administration : composition des services disponibles à travers les portails de l'administration électronique ;

- les loisirs : plates-formes thématiques de communication, de collaboration, de partage ou d'échange à destination du grand public.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : neurosciences, informatique, traitement du signal, mathématiques et leurs applications, sciences du langage, psychologie, sociologie.

- Compétences technologiques : audiovisuel, télécommunications, informatique.

- Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), EMC2 (Pays de la Loire), Viameca (Interrégional), System@tic (Île-de-France), Loisirs numériques (Rhône-Alpes), Industries du commerce (Nord-Pas-de-Calais).

- Liens avec (technologies) : outils et méthodes pour le développement de systèmes d'information ; composants logiciels ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus ; virtualisation des

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Édition, imprimerie, reproduction ; services de transports ; activités financières ; postes et télécommunications ; services informatiques ; services aux entreprises ; recherche et développement ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques ; éducation ; santé, action sociale ; administration.

Technologies de l'information et de la communication

réseaux ; sécurisation des transactions électroniques et des contenus ; acquisition et traitement de données ; gestion et diffusion des contenus numériques ; interfaces humain-machine ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; affichage nomade.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inria-Oasis, Inria Nancy, Loria, LIP6, LLF (Paris 7), Declic (Aix-en-Provence), LIRMM (Montpellier), Semantic Web enabled web services (Projet IST) (swws.semanticweb.org/swws).

Industriels : Cegelec, Thomson, Arc Informatique, Xerox Research Center Europe (Grenoble), TIL technologies, Schneider Electric, Pertinence.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : ERCIM (*European Research Consortium for Informatics and Mathematics*), MIT (États-Unis - *Open mind common sense database*), Stilo (Royaume-Uni), HP Labs (États-Unis), IBM (États-Unis).

Commentaires

Les technologies du web sémantique sont à la base des moteurs de recherche, des interfaces de navigation et des plates-formes collaboratives de demain. Cette description est plus large que la notion de Semantic Web telle que développée dans le cadre du W3C.

Technologies de l'information et de la communication



14. Interfaces humain-machine

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

L'évolution technologique induit la généralisation des fonctions d'interface humain-machine (IHM), c'est-à-dire de dispositifs matériels et logiciels qui permettent à un ou plusieurs utilisateurs de communiquer avec un dispositif chargé de réaliser une action ou de fournir une information. Ces interfaces servent à transmettre un ordre de l'humain vers le dispositif (souris d'ordinateur, volant de direction, manette de jeu, commandes de machines-outils...) ou à relayer une information du dispositif vers l'humain (écran d'ordinateur, tableau de bord automobile, alarme sonore, retour de force, réalité augmentée, synthèse vocale...). La mise au point et le test de ces interfaces constituent un processus d'autant plus complexe que la complexité des dispositifs concernés augmente également. Par exemple, la quantité d'informations à transmettre à un conducteur automobile augmente régulièrement, alors que le nombre de paramètres de personnalisation du véhicule (position de conduite, confort intérieur, alarme de sécurité...) croît également. Les interfaces posent donc des problèmes aussi bien de l'ordre de la technique (fusion de données multimodales, détermination de l'information à retransmettre, utilisation au mieux des modalités disponibles en fonction du contexte...) que de l'humain. Les interfaces doivent être adaptées à l'usage, en tenant compte par exemple de la priorité de délivrer telle information ou de réaliser telle action sur telle autre. Elles doivent prendre en compte des critères aussi variés que le type d'utilisateur (professionnel-domestique, homme-femme, enfant-adulte-personne âgée, avec ou sans formation, acceptabilité individuelle et sociale...), l'environnement (industriel-tertiaire, condi-

tions de visibilité, culture, langue, collaboratif-individuel...), la réglementation (arrêts d'urgence, types d'information...), la variété des supports (ordinateur, PDA, machine-outil, interopérabilité entre supports...), etc. Les moyens matériels de transmission de l'information et d'action bénéficient du cumul croisé d'expérience de différents secteurs d'activité : aéronautique (viseur tête haute, joystick, suivi du regard...), automobile (bandes vibrantes, volant...), informatique (fenêtres, souris, menus...), etc.

Les IHM font également l'objet d'efforts de la part des industriels vers une standardisation. C'est particulièrement vrai dans le domaine de l'informatique où se développent des boîtes à outils permettant de construire rapidement une interface visuelle adaptable aux différents systèmes, langages et contextes d'utilisation, à l'instar des outils disponibles pour le développement logiciel. Les technologies d'IHM relèvent de différents axes technologiques :

- les interfaces matérielles (écrans, manettes, claviers, interfaces haptiques, caméras, microphones...) ;
- la conception des interfaces (ergonomie, psychologie cognitive, adaptation au contexte à partir d'hypothèses...) ;
- l'électronique et l'informatique de gestion des interfaces.

Pour les années à venir, des travaux sont déjà engagés dans différentes directions telles que :

- les nouveaux modes de représentation des informations et de navigation, les nouveaux paradigmes d'interfaces pour remplacer l'interface graphique de type « Wimp » ou « métaphore du bureau » : exploitation du 3D, interfaces multimédias, médiation homme-machine, usage d'avatars ;

Technologies de l'information et de la communication

- l'IHM générique, briques logicielles permettant de construire des applications IHM adaptées ou spécialisées ; à partir de briques génériques, spécialisation des interfaces en fonction du contexte (intelligence, apprentissage) ;
- l'interaction « ubiquitaire » affranchie d'équipements par la langue naturelle, la gestuelle, la capture des mouvements d'une partie du corps ou des yeux, des émotions ou toute information « portée » naturellement par l'utilisateur ;
- les interfaces sensorielles : haptiques (toucher), vision augmentée, odorat, ouïe ;
- les technologies d'interface électronique-neurones : cette technologie basée sur des sondes miniaturisées permet de comprendre le fonctionnement des réseaux de neurones biologiques. Elle amènera un véritable saut dans le domaine des neurosciences. Des applications sont à attendre à long terme pour les neuroprothèses et les interfaces homme-machine. À ce jour il n'y a pas d'industriel mais une solide base de recherche, notamment aux États-Unis. C'est une technologie verrou pour les systèmes mixtes biologie-électronique.

La principale difficulté demeure dans la forte dimension « humaine » à appréhender dans le développement des technologies. Les technologies développées ne s'imposeront pas par leur qualité intrinsèque mais par la valeur qu'elles apportent aux services et aux produits auxquels elles sont intégrées. Notamment, elles devront gérer les éventuelles surcharges sensorielles dans des domaines tels que la conduite automobile ou certains environnements professionnels, dans lesquels l'attention de l'opérateur doit rester concentrée sur des perceptions extérieures à l'interface.

Enjeux, impact

L'enjeu technologique est de réduire un goulet d'étranglement en rapprochant les systèmes artificiels de la perception naturelle de l'homme. L'enjeu social et économique est de favoriser l'acceptabilité des fonctions communicantes dans la vie quotidienne, de concevoir des produits fonctionnels et de permettre l'accès à un plus grand nombre de personnes (handicaps, personnes âgées, etc.). Il est aussi d'imposer de nouveaux

paradigmes qui viendront se substituer à ceux qui, datant des années 70, sont actuellement dominants. Des places de leaders sont à prendre (par le biais de brevets sur ces nouveaux paradigmes par exemple).

La nécessité de tester certaines technologies sur l'humain (pour les implants neurologiques, par exemple) est un facteur qui doit être pris en compte dans le développement de ces technologies. Les aspects technologiques relatifs à la notion d'interopérabilité sont fortement contraints par les normalisations de formats d'échange pour chaque secteur d'application concerné. L'adaptation des interfaces aux préférences des utilisateurs impose le stockage d'informations personnelles et par conséquent des problématiques en relation avec la protection de la vie privée. Au cours des dernières années, ce domaine technologique a été fortement influencé par les secteurs de la défense et du jeu, secteurs dans lesquels la France se distingue. L'impact est très fort puisqu'il s'agit de l'acceptabilité de l'informatique ambiante et de rendre possible l'accès ubiquitaire à l'information, à la communication. De nombreuses applications ne pourront voir le jour faute de mode d'interaction adapté, notamment dans le monde du logiciel embarqué où le système est transparent pour l'utilisateur qui ne voit que l'interface.

Marché

Les interfaces humain-machine sont centrales pour de nombreux secteurs d'application : électronique personnelle, environnements industriels, automobile, défense, aéronautique, etc. C'est une technologie à très fort potentiel diffusant. On estime le marché mondial des interfaces humain-machine à 590 M\$ en 2006 (vente de produits et services liés aux IHM). Le marché mondial est en croissance annuel de 6 %, contre 10 % pour la seule Europe.

Par ailleurs, l'étude de marché met en évidence la priorité accordée au développement d'interfaces permettant la gestion d'information en temps réel, notamment pour les secteurs de la logistique, de l'assurance qualité, de la planification ou de la maintenance.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; industries des équipements mécaniques ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques ; travaux publics ; services de transports ; activités financières ; postes et télécommunications ; recherche et développement ; éducation ; santé, action sociale ; administration.

Technologies de l'information et de la communication

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : informatique, automatique, traitement du signal, électronique, sciences du langage, psychologie, sociologie, neurosciences.

■ Compétences technologiques : composants électriques, audiovisuel, télécommunications, informatique, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Vestapolis (Île-de-France), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace, Franche-Comté), Ville et mobilité (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine, Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : sécurité active des véhicules ; composants et systèmes logiciels ; acquisition et fusion de données ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant ; capteurs intelligents et traitement du signal ; méthodes et outils de coconception ; ingénierie des systèmes complexes ; technologies d'authentification ; affichage noma-

de ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences et industriels : une partie des acteurs français sont regroupés au sein de l'AFIHM (Association francophone d'interaction homme-machine) (www.afihm.org/sites-web/organismes.html). Parmi les adhérents : CENA-PII (Toulouse et Athis-Mons), EMN-CMI (Nantes), ENST-13 (Paris), Eurecom (Sophia Antipolis), Eurisco ICTT (Lyon), IRIT-IHMPT (Toulouse), Imag-Clips (Grenoble), LAMIH (Valenciennes), LIHS (Toulouse), LIMSI (Orsay), LIRMM-IHMH (Montpellier), LISI (Poitiers), LRI-IHM (Orsay), Merlin (Inria), Trigone (Lille), Valoria-Équipage (Vannes), EDF, Ilog User Interface Research, La Poste-SRTP, FTRD.

On ne cite ici que des acteurs dont la principale activité est liée aux IHM. L'ensemble des industriels des domaines d'applications cités précédemment ont également une activité forte dans les interfaces humain-machine.

Technologies de l'information et de la communication



15. Modélisation, simulation, calcul

Description

Le monde industriel cherche de plus en plus à représenter le réel pour concevoir des outils ou produits adaptés à une fonction donnée en diminuant les délais de mise au point et les coûts de prototypage. Dans ce but, il est de plus en plus fait appel à la modélisation des phénomènes ou à la simulation numérique qui en découle. On parle souvent de prototypage virtuel pour désigner cette étape de première validation numérique.

Un des verrous majeurs à lever à l'heure actuelle consiste à aller de plus en plus finement dans la modélisation et la simulation des objets ou processus. Notamment, les changements d'échelle des objets manufacturés, qui atteignent maintenant des grandeurs caractéristiques de l'ordre du nanomètre, font apparaître, au cours de leur conception et dans leur fonctionnement, des phénomènes microscopiques pour lesquels les modèles macroscopiques utilisés jusqu'alors ne sont plus pertinents. De même, la conception d'un objet quelconque fait de plus en plus appel à des disciplines variées. Le deuxième défi à relever consiste donc à faire coopérer les différentes disciplines de l'ingénieur lors de modélisations mettant en jeu des univers différents. Il s'agira, par exemple, d'approches multiphysiques, multimatériaux ou multiéchelles, de raisonnement sur des éléments incomplets ou encore de la prise en compte de contraintes issues d'univers de référence différents.

Les problématiques sont identiques pour ce qui concerne la modélisation des processus naturels et de leurs interactions avec les activités humaines, de l'échelle globale, la terre, à celle de la rue ou de l'appartement.

Outre la validité des modèles utilisés, la qua-

lité de la simulation est également tributaire d'un recalage permanent des modèles sur la réalité observée. Ainsi, la modélisation et la simulation sont fortement liées à des problématiques de mesure et d'acquisition de données réelles.

Par ailleurs, les outils de simulation se situent, de plus en plus, dans un environnement de partage de l'information (*Méthodes et outils de coconception*).

La simulation de phénomènes impliquant un grand nombre de données, faisant appel à des physiques différentes (mécanique des fluides, thermique, etc.) impose l'intégration de différents logiciels. En termes informatiques, cela se traduit par la nécessité de coupler les codes, technologie encore maîtrisée trop faiblement. Les calculs requis sont, par ailleurs, extrêmement intensifs et imposent l'accès à des serveurs puissants, des grilles de calculs ou des clusters.

Enjeux, Impact

Le besoin en simulation de plus en plus poussée est porté par un contexte international de concurrence accrue, avec l'arrivée de nouveaux acteurs sur les marchés (Chine, Inde, etc.) et l'amélioration continue de la productivité des industries, rendant nécessaires des diminutions importantes des coûts de conception des nouveaux objets et processus industriels. Il est en effet moins coûteux de décrire le produit ou le processus aux moyens de systèmes informatiques que de les construire pour affiner leur conception. On converge alors plus rapidement et à moindre coût vers plus de qualité.

L'usage de ces techniques a tendance à se diffuser largement dans les entreprises industrielles, notamment au sein des PMI par le biais de projets coopératifs tels que

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies de l'information et de la communication

« Salome »⁽⁶⁾ qui fournit des éléments en logiciels libres pour la liaison CAO-calcul. L'externalisation de certaines tâches de conception des constructeurs (automobile et aéronautique notamment) vers des sous-traitants de rang un accélère l'appropriation de ces techniques et facilite l'interopérabilité entre les systèmes d'information de ces acteurs.

Le développement des approches de modélisation et de simulation représente un enjeu majeur dans le domaine des sciences du vivant. En effet, le domaine biomédical a dû acquérir, classer et stocker la masse des données disponibles issues du séquençage, avec une prise en compte des problèmes qui se posent pour aller du gène à la formation de la protéine, à son contrôle et à sa signification physiologique et physiopathologique (protéomique et génomique fonctionnelle à grande échelle). Il s'agit maintenant d'analyser ces données hétérogènes, d'identifier les événements significatifs et de les interpréter, en utilisant les techniques de modélisation et de simulation. L'objectif est de développer des modèles mathématiques destinés à simuler des schémas simples et de les confronter aux résultats expérimentaux obtenus par un dialogue continu entre biologistes, mathématiciens et informaticiens. Ces approches constituent une démarche globale pluridisciplinaire, nécessitant une collaboration permanente de biologistes, chimistes, physiciens, médecins, informaticiens et mathématiciens. Elles permettent d'intégrer des données de différentes sources afin de créer un modèle théorique fidèle aux propriétés et au comportement du système.

Dans ce contexte, le LEEM (Les entreprises du médicament) a récemment affiché le maillage des différentes expertises biologiques, cliniques et d'ingénieur comme un enjeu clé. En complément de ce maillage d'expertise en R&D, il est nécessaire de renforcer certaines compétences « traditionnelles » de l'industrie du médicament, notamment en matière de biostatistiques et mathématiques.

La modélisation est également un enjeu important en matière de prévisions météoro-

logiques, climatiques ou environnementales. Elle concerne :

- la prévision immédiate (jusqu'à six heures), à courte échéance (jusqu'à deux ou trois jours d'échéance) ou saisonnière (de un mois à un an d'échéance) ;
- la prévision d'ensemble basée sur des mono et multimodèles à issues d'une dizaine de centres de prévision, les plus performants dans le monde ;
- la prévision du climat (changement climatique sur quelques siècles) et de l'environnement urbain (pollution).

L'amélioration de la prévision à ces échéances est largement conditionnée par l'accès à de supercalculateurs et la prise en compte de phénomènes physiques, chimiques et biologiques (végétation), d'échelle de plus en plus fine.

Marché

Les approches de modélisation sont largement utilisées dans de nombreux secteurs industriels, par exemple l'aéronautique, le nucléaire, etc. On les rencontre également dans l'industrie pharmaceutique et la santé en général (médecine moléculaire et cellulaire, cancer, infection, système nerveux central...), avec le diagnostic, le pronostic, le suivi, la thérapeutique ; mais aussi l'agronomie, la sécurité alimentaire, la cosmétique. Le marché mondial des seuls logiciels de simulation (sans compter les matériels, intergiciels de grille, etc.) est estimé en 2005 à 2,35 Md\$, et devrait atteindre 4Md\$ en 2010. La simulation et le prototypage représentent, en 2005, le quart des dépenses liées à la gestion du cycle de vie des produits.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : à travers les applications potentielles de cette technologie, l'ensemble des disciplines scientifiques est concerné.

■ Compétences technologiques : informatique, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : Plasturgie (Rhône-Alpes et Franche-Comté) ; EMC2 (Pays de la Loire) ; Viameca (Interrégional) ; Vestapolis (Île-de-France) ; Sports et loisirs (Rhône-Alpes) ; System@tic (Île de France) ; Véhicule du futur (Alsace, Franche-Comté) ; Minalogic

Degré de diffusion de la technologie

100

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements mécaniques ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; chimie, caoutchouc, plastiques ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques ; bâtiment ; travaux publics ; activités financières ; recherche et développement ; production-distribution agroalimentaire ; tourisme ; santé, action sociale.

(6) Le projet Salome vise à améliorer la diffusion des logiciels de simulation numérique développés en France.

Technologies de l'information et de la communication

(Rhône-Alpes) ; Aéronautique et espace (Aquitaine, Midi-Pyrénées) ; Biothérapies (Pays de la Loire) ; Industries et agroressources (Champagne-Ardenne, Picardie) ; Cosmetic Valley (Centre, Île-de-France, Haute-Normandie) ; Meditech Santé (Île-de-France) ; Gestion des risques et vulnérabilités des territoires (Paca, Languedoc-Roussillon).

■ Liens avec (technologies) : thérapie cellulaire ; protéomique ; génomique fonctionnelle à grande échelle ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; stockage de l'information numérique ; composants logiciels ; acquisition et traitement de données ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; méthodes et outils de coconception ; ingénierie des systèmes complexes ; microtechnologies pour l'intensification des procédés.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inria, CEA, CSTB, Cetim, CNRS, Inserma, Cirad, Inra, École centrale Paris, Agro Paris, Agro Montpellier, Université d'Orsay, LEEM pour les sciences du vivant, Météo France.

Industriels : Dassault Systèmes, Esi Group, Mecalog, Open Cascade, Optis, Prosim, Dolphin Intégration, Gridxpert, Distene, Sitia, Arvalis, Bionatics, CGB, ITB, Itelios pour les sciences du vivant, Météorage pour les services de prédiction de la foudre.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : MSC Software (États-Unis), Abaqus (États-Unis, Dassault), Altair (États-Unis), Ansoft (États-Unis), Fluent (États-Unis), Flowmaster

(Royaume-Uni), CD-Adapco (Royaume-Uni), Comsol (Suède), Transoft (États-Unis), LMS (Belgique), Maplesoft (Canada), The Mathworks (États-Unis), MoldFlow (États-Unis), Numeca (Belgique) ...

Commentaires

En 2001, la simulation et la modélisation multi-échelle des microstructures et des lois de comportement des matériaux ont été définies comme thèmes prioritaires de développement par le Comité de coordination des matériaux (Cocomat).

Le projet RNTL « Salome » rassemble 22 partenaires représentant la plupart des sciences de l'ingénieur, afin de mettre au point, en logiciel libre, une plate-forme permettant de faire coopérer des codes de calcul différents et de les relier, en amont vers les systèmes de CAO et en aval vers les systèmes de navigation dans les univers des résultats.

Il existe un réseau d'excellence financé par l'Union européenne, « BioSim » (pour biosimulation). L'objectif de ce réseau est de développer des modèles de simulation pour le développement et la sélection de médicaments (www.futura-sciences.com/news-bio-simulation-nouvel-outil-developpement-medicaments_7214.php).

Le projet Aladin regroupe la communauté météorologique française et celle d'une vingtaine de pays d'Europe centrale et orientale et du Maghreb.

Technologies de l'information et de la communication



16. Réalité virtuelle, augmentée, 3D

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

La réalité virtuelle est un domaine scientifique et technique ayant pour objectif de simuler, dans un monde entièrement virtuel, le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel entre elles et avec un ou plusieurs utilisateurs en immersion pseudo-naturelle. On parlera plutôt d'animation d'images de synthèse lorsqu'il n'y a pas d'interaction entre le monde virtuel et l'humain.

La réalité augmentée est un cas particulier de réalité virtuelle consistant à superposer un « monde virtuel » au monde réel, généralement pour servir un objectif particulier tel que la visualisation d'informations.

Ces trois domaines exploitent les technologies informatiques et les interfaces matérielles, en particulier :

- les moyens informatiques, matériels et logiciels permettent de réaliser techniquement un environnement virtuel interactif qui puisse être interfacé avec l'utilisateur ;
- les technologies permettant la simulation en temps réel d'entités (objets, personnages virtuels, etc.) selon des lois physiques (mécaniques, optiques, acoustiques, etc.) et des lois comportementales (psychologiques, sociales, affectives, etc.) ;
- les moyens matériels permettant la communication entre l'utilisateur et le monde virtuel. On distingue deux types d'interfaces, les interfaces sensorielles qui permettent d'informer l'utilisateur par ses sens de l'évolution du monde virtuel et les interfaces motrices qui informent l'ordinateur des actions de l'utilisateur sur le monde virtuel. Les deux problèmes majeurs de la réalité virtuelle sont la création du monde virtuel et l'interfaçage entre le sujet et le monde virtuel. Les difficultés rencontrées sont de trois ordres :

- il faut modéliser et traiter informatiquement un monde virtuel évoluant en temps réel : les modèles peuvent être simplement descriptifs, au comportement déterministe, ou autonomes et requièrent des temps de calcul généralement très importants ;
- l'interaction en temps réel est obtenue si l'utilisateur ne perçoit pas le décalage temporel entre son action sur l'environnement virtuel et la réponse sensorielle. Cette contrainte étant difficile à satisfaire, on cherchera à minimiser les perturbations induites par ce décalage au niveau de la perception de l'utilisateur ;
- l'immersion de l'utilisateur ne peut pas être naturelle dans la mesure où nous sommes conditionnés à agir naturellement avec un environnement répondant à des lois naturelles. La réalité virtuelle cherche à créer un environnement le plus naturel possible, on parle alors d'immersion pseudo-naturelle. L'efficacité d'une immersion pseudo-naturelle est une notion très subjective qui dépend de l'application et du matériel utilisé. Sur le plan technologique, les ambitions affichées par le domaine de la réalité virtuelle permettent de tirer la connaissance et les technologies par le haut et de générer des retombées profitables, notamment en matière de :
 - technologies 3D, synthèse, animation, temps réel ;
 - interfaces hommes-machines ;
 - agents intelligents, avatars ;
 - visualisation de grandes masses de données.

Enjeux, Impact

La 3D se généralise : jeux en réseau, services de téléphonie 3G, visioconférence, messagerie électronique, visualisation de don-

Technologies de l'information et de la communication

nées 3D professionnelles et collaboratives, visualisation d'informations intégrées à l'environnement (chemin à suivre calqué sur une image temps réel de l'environnement visualisé), etc. L'arrivée de ces nouvelles applications pose la question de l'adoption d'un standard 3D performant. Publié en 1994, le VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) est l'un des rares standards 3D complètement publics mais il a eu du mal à s'imposer en dehors des universités et des bureaux d'études. Il n'existe à ce jour pas de consensus et plusieurs grands constructeurs informatiques, chacun de leur côté, développent leur propre format comme par exemple :

- X3D (*eXtensible 3D*) développé par le consortium Web3D regroupant en particulier Sony, Sun, 3Dlabs, Alias, l'US Navy, France Télécom ou EDF. Plus particulièrement destiné à répondre aux enjeux de diffusion de contenu 3D via les terminaux mobiles et des environnements broadcast, comme les boîtiers de télévision numérique, ce format de description de scènes 3D, certifié Iso et basé sur le standard XML, embrasse l'ensemble de la création graphique en 3D : des animations légères destinées au web aux applications les plus complexes, utilisées par la réalité virtuelle ;

- U3D (*Universal 3D Format*) approuvé en décembre 2004 par l'Ecma (*European Computer Manufacturers Association*) et promu par le 3DIF : Dassault Systèmes, Adobe, Boeing, HP, ATI, Nvidia et Bentley Systems. Aussi basé sur XML mais moins évolué que X3D en matière de modélisation géométrique de haut niveau, le 3DIF axe ses développements sur la notion de compression adaptative, autorisant par exemple la diffusion sur Internet des objets 3D en affichant une version à basse résolution avant que le fichier ne soit entièrement téléchargé ;

- développé par Dassault Systèmes, 3D-XML est un format particulièrement destiné aux applications de PLM (*Product Lifecycle Management*). Outre les objets 3D, 3D-XML permet de décrire des informations relatives à la fabrication des produits (mode d'assemblage sur la chaîne de production par exemple). Sous peu, le format 3D-XML devrait devenir compatible avec l'environnement XAML développé par Microsoft pour la description d'interfaces utilisateurs nouvelle génération.

De nombreux autres formats 3D existent. Il faut, en particulier, mentionner la composante 3D du standard multimédia MPEG-4.

Marché

Les applications finales des technologies 3D et de la réalité virtuelle sont diverses :

- visualisation d'informations « tête haute » (dans des situation de conduite routière par exemple) ;
- affichage d'informations contextuelles invisibles à l'oeil nu (chemin à suivre, zones dangereuses...) ;
- environnements de formation pour l'industrie manufacturière ;
- formation et assistance aux interventions médicales, à partir de données fournies par les scanners modernes dont la résolution approche le millimètre (voir web.reseachu.org/articleview.do?id=735&mode=2) ;
- prototypage virtuel, maquette numérique ;
- industrie des jeux ;
- TV interactive 3D.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : neurosciences, chimie physique, physique théorique, optique, mécanique des fluides, génie des matériaux, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, sciences du langage, psychologie, sociologie.

■ Compétences technologiques : audiovisuel, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique.

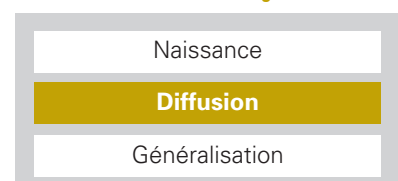
■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Loisirs numériques (Rhône-Alpes), System@tic (Île de France), Elopsys (Limousin, Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : processeurs et systèmes ; composants logiciels ; acquisition et traitement de données ; gestion et diffusion des contenus numériques ; modélisation, simulation, calcul ; interfaces humain-machine ; affichage nomade ; capteurs intelligents et traitement du signal, méthodes et outils de coconception ; imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Irisa (Rennes),

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application

Édition, imprimerie, reproduction ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries extractives ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; industrie textile ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de matériel électrique ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ; bâtiment ; travaux publics ; services de transports ; activités financières ; services informatiques ; services aux entreprises ; recherche et développement ; activités récréatives, culturelles et sportives ; éducation ; santé, action sociale ; administration.

Technologies de l'information et de la communication

CEA, INT-Artemis (Paris), BRGM, Clarte (Laval).

Industriels : Dassault Systèmes, EDF, PSA, Renault, EADS, Institut français du pétrole, CS Communication & Systems, France Télécom, Thales, Sell (Syndicat des éditeurs de logiciels de loisirs), Mercury Computer Systems (ex-TGS), RATP, Haption, Simteam.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : MIT

Medialab (États-Unis), Silicon Graphics (États-Unis), Alias (Canada), Projet IST Olga (www.hitech-projects.com/euprojects/olga/index.htm).

Commentaires

Pour en savoir plus, résultats des travaux menés dans le cadre de la plate-forme RNTL PerfRV : (www.perfrv.org).

Technologies de l'information et de la communication



17. Affichage nomade

Description

La multiplication des applications électroniques et informatiques portables crée un enjeu en terme de portabilité des dispositifs d'affichage. L'affichage nomade est une des clés techniques de différentes applications telles que la téléphonie mobile, les juke-box vidéo, les consoles de jeux portables, les PDA, les ordinateurs portables. Il rencontre également des préoccupations liées à d'autres évolutions des modes de travail et de divertissement : travail collaboratif, jeux en réseau, etc.

Cette famille de technologies est donc porteuse de potentiels de développement forts pour différents types de technologies :

- écrans de petite dimension, à faible consommation : ils peuvent être en couleur et à haute résolution (LCD-TFT, Oled...) pour des applications dans le domaine du divertissement (consoles de jeux portables, téléphones...) ou de la photographie numérique (haute résolution, bonne restitution des couleurs, faible consommation). L'élargissement de l'angle de vue utile et l'amélioration du contraste sont des verrous importants de la technologie ;
- écrans à très faible consommation pour affichage permanent : entrent dans cette ligne de technologie les écrans bistables, qui conservent leur affichage sans apport d'énergie. Ils n'ont besoin d'être alimentés que lors du changement des informations affichées. Une technologie utilisée dans ce cas est la technologie des cristaux liquides bistables ;
- dispositifs d'affichage « lunettes » : regroupés en anglais sous le sigle HMD (*Head Mounted Display*), ils permettent d'imaginer des applications nouvelles : réalité augmentée par superposition d'informations sur la

vue réelle (industrie, défense, tourisme...), immersion dans l'image, affichage large (vidéo, jeux), affichage 3D stéréoscopique, etc. Ces dispositifs tirent parti de technologies telles que la projection rétinienne directe, par laser ou optique conventionnelle ;

- afficheurs souples : les afficheurs souples (ou écrans souples) sont un secteur en fort développement. Les applications concernent d'une part des affichages nomades, d'autre part la possibilité d'afficher des images ou de l'information sur des surfaces complexes. Il est ainsi possible de doter un téléphone portable d'un écran déroulable de 5 pouces de diagonale ;

- projecteurs miniaturisés : la diminution de la taille des projecteurs vidéo les rend compatibles avec des applications nomades.

Outre les technologies d'afficheurs proprement dits, de nombreux verrous techniques sont encore présents, que ce soit au niveau :

- de l'électronique et de l'informatique de commande : le système de commande des afficheurs, et notamment de décodage-encodage des images fixes ou animées est un verrou technique important. Il est l'objet d'un arbitrage entre la part de matériel (*hardware*, circuits dédiés ou programmables) et de logiciel (*software*), en fonction des contraintes spécifiques de l'application : encombrement, rapidité de traitement, consommation, coût d'industrialisation, mises à jour, etc. ;
- des standards de transmission et de stockage des images fixes ou animées : notamment, outre les images 2D classiques (JPEG, MPEG-4, DVB, DMB...), le développement d'interfaces de visualisation 3D pose le problème des nouvelles normes de représentation des images. À l'heure actuelle,

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies de l'information et de la communication

aucun standard industriel ne s'est imposé dans la mesure où le marché est émergent ;

- de l'éclairage et de la consommation : les technologies de rétroéclairage de certains écrans et la gestion de l'énergie ont des implications importantes dans le confort d'utilisation et l'autonomie des dispositifs portables. L'utilisation de LED blanches dont l'intensité émise est adaptée à l'image et au contexte est un exemple de technologie allant dans le sens d'une gestion intelligente de l'énergie. On note que la réduction de la consommation des composants est également une préoccupation constante des fabricants d'ordinateurs portables.

Enjeux, Impact

Si les acteurs français de la visualisation sont peu nombreux et de petite taille, la maîtrise de l'intégration de ces technologies dans des produits a un impact immédiat sur la capacité des industriels français à rester compétitifs en proposant des interfaces de visualisation qui soient d'une part à la pointe de l'innovation en termes de fonction, d'autre part en phase avec les attentes du marché sur les dispositifs nomades.

Marché

Les marchés servis par les afficheurs nomades sont au premier chef la téléphonie mobile et le divertissement. En 2004, le marché mondial des téléphones mobiles s'est élevé à environ 650 millions d'unités, soit autant d'afficheurs (voire plus, certains téléphones possédant deux afficheurs). Le marché des jeux portables était de l'ordre de 3,9 Md\$ dans le monde en 2003 (matériel et logiciel), et devrait atteindre 11 Md\$ en 2007.

Le seul marché des afficheurs Oled pourrait atteindre 1,6 Md\$ en 2007.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : chimie moléculaire, matériaux, optique, informatique, traitement du signal, électronique, optronique.

- Compétences technologiques : audiovisuel, informatique, semi-conducteurs, opti-

que, chimie organique, chimie macromoléculaire, chimie de base.

- Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Vestapolis (Île-de-France), Elopsys (Limousin, Midi-Pyrénées), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais, Picardie), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace, Franche-Comté), Ville et mobilité (Île-de-France), Minalogic (Rhône-Alpes), Loisirs numériques (Rhône-Alpes).

- Liens avec (technologies) : gestion de la microénergie ; gestion et diffusion des contenus numériques ; interfaces humain-machine ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; matériaux pour l'électronique et la mesure ; micro et nanocomposants ; procédés et systèmes de photonique ; composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré.

- Principaux acteurs français

Les acteurs français du domaine de l'affichage nomade sont peu nombreux, mais les industries utilisatrices concernent au premier chef un grand nombre d'industriels. Parmi les acteurs français, on peut citer :

Centres de compétence : CEA-Leti, École polytechnique-LPICM.

Industriels : Nemoptic, Thales, Essilor.

- Exemples d'acteurs dans le monde : Texas Instruments (États-Unis), Samsung (Corée du Sud), Philips (Pays-Bas), Sony (Japon), Hitachi (Japon), Sharp (Japon), Optrex (Japon), Kyocera (Japon), E-Ink (États-Unis), Kodak (États-Unis), MicroOptical (États-Unis).

- Pour en savoir plus : Club Visu de la Société française d'optique (www.clubvisu.org).

Commentaires

On note que la commercialisation de téléphones mobiles possédant un écran LCD produisant un effet stéréoscopique a commencé au Japon.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

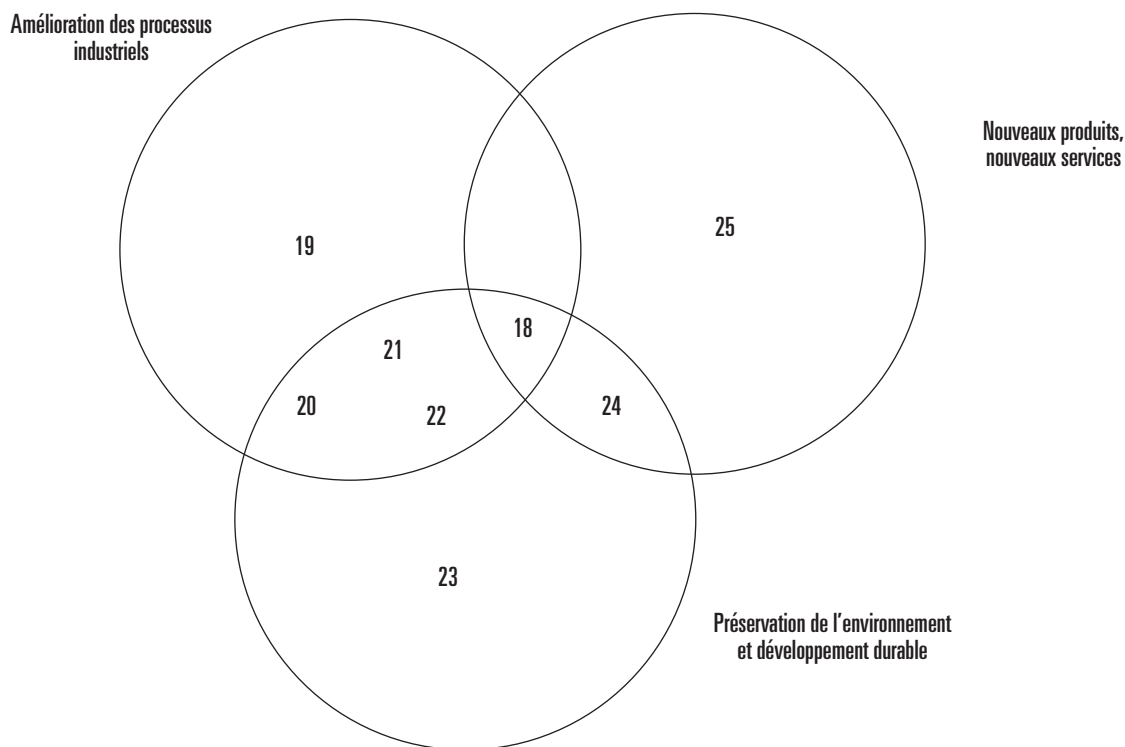
Édition, imprimerie, reproduction ; industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; bâtiment ; travaux publics ; postes et télécommunications ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques ; éducation.



Matériaux - chimie

- 18 Matériaux nanostructurés et nanocomposites
- 19 Matériaux pour l'électronique et la mesure
- 20 Procédés catalytiques
- 21 Biotechnologies industrielles
- 22 Microtechnologies pour l'intensification des procédés
- 23 Recyclage des matériaux spécifiques
- 24 Fonctionnalisation des matériaux
- 25 Textiles techniques et fonctionnels

Des grands enjeux aux technologies clés



108

Le secteur des matériaux et de la chimie

Le contexte

Le secteur des matériaux et de la chimie

représente un ensemble très diversifié de matériaux et de produits chimiques, ayant pour certains subi une première transformation ou mise en œuvre. Ce secteur, dont le chiffre d'affaires HT en France en 2003 a atteint 193 Md€, offre des produits qui ont un positionnement transversal par rapport à l'ensemble des secteurs industriels dont ils constituent les matières premières. Bien qu'hétérogène, le secteur des semi-produits doit

faire face à des enjeux largement partagés par les différents matériaux et produits chimiques concernés, et par les industries qui les fabriquent. Enfin, ce secteur est caractérisé par une relation très forte entre l'évolution de ses produits et des procédés qu'ils utilisent. Les enjeux et les tendances technologiques qui y sont associées traduisent clairement cette dépendance produit-procédé.

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises*
Produits minéraux	26	138	1 220
Bois et papiers	26	125	1 289
Chimie, caoutchouc, plastiques	82	337	2 234
Métallurgie, transformation des métaux	59	346	3 837
Total	193	946	8 580

(*) entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries des biens intermédiaires -enquête annuelle entreprises 2003 (Sessi - juillet 2005)

Matériaux minéraux non métalliques

En 2003, le chiffre d'affaires HT (CAHT) français du secteur atteint 26,1 Md€, décomposés comme suit :

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises*
Produits de carrière, minéraux	4,1	20,1	343
Fabrication et articles verre	6,9	45,5	178
Céramiques, matériaux de construction	15,1	72,0	697
Total produits minéraux	26,1	137,7	1 220

(*) entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries des produits minéraux - enquête annuelle entreprises 2003 (Sessi - juillet 2005)

Ce secteur regroupe, outre les activités de fabrication d'articles ou de matériaux minéraux, dont le verre et les articles en verre, les matériaux de construction, les produits céramiques et les activités amont d'extraction des mines et des carrières.

L'extraction des produits de carrières et minéraux divers trouve des débouchés dans le BTP (granulats, pierres de construction, ardoises...), l'industrie (minéraux industriels) et l'agriculture (phosphates naturels, sels de potassium, ...). Le CA français sur l'activité a atteint 4,1 Md€ HT en 2003. Globalement, les produits de carrières, pondéreux et de faible valeur unitaire, se prêtent peu aux échanges internationaux. Cette situation générale cache, cependant, des disparités très importantes, en particulier sur les minéraux industriels sources d'importants excédents (talc) ou déficits (kaolin) commerciaux.

En 2003, 178 entreprises, représentant 45 500 salariés, ont réalisé un CA de 6,9 Md€ HT dans la fabrication de verre et d'articles en verre. Les marchés concernés sont notamment la construction et l'automobile (verre plat), l'emballage (verre creux), l'industrie (produits

techniques en verre). L'industrie du verre est très concentrée : cinq opérateurs réalisent 70 % du tonnage mondial dans le verre plat. Le marché du verre plat est largement conditionné par l'évolution des marchés de la construction et de l'automobile. Le marché de la construction, plus cyclique, concerne essentiellement la France et les pays limitrophes. L'industrie du verre creux est largement internationale. Les taux d'exportation sur l'emballage des produits de luxe et la cristallerie sont très élevés. En revanche, l'emballage alimentaire est très fortement soumis à la concurrence internationale, notamment asiatique. Le marché des fibres de verre est également très international.

Le secteur des matériaux de construction et des produits en céramique représente un CAHT de 15,1 Md€ en 2003, 72 000 salariés et 697 entreprises. Les matériaux de construction comptent pour plus de 70 % (11 Md€) de ce CA, sur un marché quasi exclusivement national, dépendant des évolutions du bâtiment et des travaux publics. L'industrie cimentière est très fortement concentrée, alors que la fabrication d'éléments en béton est dispersée. Le

secteur des céramiques est largement international et présente des situations contrastées : par exemple un taux d'exportations-CA de 65 % dans les réfractaires, alors que les céramiques à usage sanitaire, domestique ou ornemental sont concurrencées par les productions des pays voisins.

Les industriels français sont positionnés sur l'ensemble du secteur : Lafarge, Saint Gobain ou Imerys sont ainsi des leaders mondiaux dans leurs domaines d'activités. En 2001, l'industrie française des produits minéraux non métalliques occupait la 4^e position de l'Union européenne en terme de valeur ajoutée (l'Allemagne et l'Italie étant les deux leaders européens). La production augmente à un rythme de 2 % par an en moyenne. L'emploi chute en revanche de 1,5 % par an. En 2001, l'UE 25 réalise un excédent commercial de 8,4 Md€ dans ce secteur. Un quart de ses exportations est destiné aux États-Unis.

Papier et bois

Le chiffre d'affaires du secteur atteint 25,9 Md en 2003 en France, répartis comme suit :

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises*
Travail du bois et article en bois	7,0	44,1	690
Pâte, papier, carton	7,9	26,5	118
Articles en papier et carton	11,0	54,8	481
Total bois, papier, carton	25,9	125,5	1 289

* entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries du bois, papier, carton - enquête annuelle entreprises 2003 (Sessi - juillet 2005)

Dans la filière bois, près de huit entreprises sur dix emploient moins de 100 salariés et elles représentent plus de 40 % du chiffre d'affaires, qui s'élève à 7 Md en 2003. Trois activités sont principalement concernées : l'industrie des panneaux (24 % du CAHT du secteur), l'industrie de la fabrication de charpentes et de menuiserie (43 %) et l'industrie de l'emballage (22 %). Les deux premières activités sont largement conditionnées par le marché du bâtiment et profitent, en 2005, de son dynamisme.

L'industrie papetière est une industrie lourde, fortement automatisée, très concentrée et soumise à des mouvements cycliques de production. Le tiers des entreprises réalise plus de 75 % du CAHT français, qui atteint 7,9 Md€ en 2003. L'industrie papetière française utilise largement des matières premières secondaires issues du recyclage ; c'est également le cas en aval pour l'industrie des articles en papier et carton dont les applications sont les papiers à usage graphique, les papiers à usage domestique et sanitaire, les papiers industriels et techniques et l'emballage. La plupart

des installations industrielles de production de pâte et de papier appartiennent à des groupes internationaux étrangers. Certains de ces groupes ont cependant des centres de décision en matière d'innovation implantés en France, et des entreprises françaises sont positionnées sur les papiers techniques.

En 2001, la valeur ajoutée hors taxes (VAHT) de l'industrie française du bois et du papier est la 4^e de l'Union européenne. Les exportations européennes de bois et de papier se sont élevées à 23,8 Md€ en 2002 (2,9 % des exportations industrielles). L'UE 25 réalise un déficit commercial de 1,1 Md€ pour le bois et un excédent de 5,7 Md€ pour le papier.

Chimie, caoutchouc et plastique

Le chiffre d'affaires du secteur atteint 82,4 Md€ en France en 2003, répartis comme suit (voir tableau ci-dessous).

Ce secteur regroupe des industries de production et de transformation des matériaux dont les caractéristiques et

les problématiques sont très différentes. C'est notamment le cas pour la concentration ou le nombre d'entreprises par sous-secteur.

Le chiffre d'affaires de l'industrie de la chimie atteint 46,1 Md€ dont 16,5 % pour la chimie minérale, 46,6 % pour la chimie organique et 36,9 % pour la parachimie (produits agrochimiques, peintures, vernis et encres, produits explosifs...). L'industrie chimique est très capitalistique, en particulier pour ce qui concerne la chimie organique. Celle-ci regroupe la production des intermédiaires et la chimie fine, ainsi que la production des matières plastiques de base, des caoutchoucs synthétiques et des élastomères. La chimie minérale est un secteur hétérogène, constitué de quatre branches : fabrication de gaz comprimés, fabrication de pigments et colorants, fabrication de produits chimiques inorganiques (acides minéraux, produits de l'électrolyse,...) et la fabrication d'engrais et de produits azotés.

Le marché de la chimie est fortement mondialisé, et la présence de groupes étrangers en France est importante.

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises*
Chimie minérale	7,6	21,2	119
Chimie organique	21,5	43,4	180
Parachimie	17,0	52,8	351
Fibres artificielles ou synthétiques	0,6	2,321	11
Industrie du caoutchouc	10,7	67,8	159
Transformation des matières plastiques	25,0	149,8	1 414
Total chimie, caoutchouc et plastique	82,4	337,4	2 234

(*) entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries de la chimie, du caoutchouc et des plastiques - enquête annuelle entreprises 2003 (Sessi - juillet 2005)

Dans la chimie organique, ces groupes réalisent plus de 50 % du CAHT et des exportations. Les échanges de la chimie organique française restent excédentaires, alors que la chimie minérale présente un déficit commercial élevé.

Les industries des fibres et de la fabrication d'articles en caoutchouc sont des industries de production très concentrées. La fabrication des fibres artificielles et synthétiques se situe en amont de l'industrie textile. Ce sont les fibres les plus utilisées dans le monde avant le coton. L'industrie française est déficitaire, avec de fortes importations d'Allemagne et d'Italie notamment. Pour la fabrication du caoutchouc, 60 % des 10,7 Md€ de CAHT correspondent à la fabrication des pneumatiques et chambres à air pour les transports.

La transformation des matières plastiques est une industrie constituée d'un nombre important de PMI. Elle apparaît comme une des branches les plus dynamiques de l'industrie manufacturière, et connaît une croissance régulière. Les marchés concernés sont nombreux : automobile, emballage, bâtiment, industrie électrique et électronique, aéronautique, spatial, médico-chirurgical. Cette diversité permet de compenser le recul des activités sur des marchés difficiles (emballage) par des applications en essor (automobile, aéronautique).

En 2001, la France occupait la deuxième

position des pays européens pour la VA de l'ensemble du secteur chimie, caoutchouc et plastique. L'excédent commercial de l'Union européenne (15 pays) dégagé par les produits chimiques et plastiques (hors chimie pharmaceutique) était de 34,2 Md€ en 2002.

Métallurgie et transformation des métaux

Le chiffre d'affaires du secteur atteint 59 Md€ en France en 2003, répartis comme suit (voir tableau ci-dessous). Ce secteur rassemble des industries de production très concentrées et des industries de transformation regroupant de nombreuses PMI.

La sidérurgie réalise en 2003 un CAHT de 16,4 Md€. Elle est composée, outre de l'industrie sidérurgique proprement dite, des fabricants de tubes en fonte et en acier, et des industries pratiquant l'étirage, le laminage, le profilage et le tréfilage à froid. L'industrie sidérurgique est particulièrement concentrée : 44 entreprises emploient 39 000 salariés pour un CAHT de 12 Md€ ; les dix premières entreprises, appartenant pour la plupart aux leaders mondiaux du secteur, emploient 52 % des effectifs et réalisent plus de 56 % des ventes. Au niveau mondial, le marché est caractérisé par la stabilité de la demande européenne, mais le fait marquant est la

poussée de la demande chinoise. Le marché national est porté notamment par la construction et l'automobile.

Les métaux non ferreux, avec un CAHT de 7,6 Md€ en 2003, connaissent des situations contrastées. Les productions des métaux précieux, du plomb et du cuivre connaissent des difficultés, alors que l'aluminium est positionné sur des marchés pour lesquels la demande est soutenue (bâtiment, emballage, automobile et aéronautique) et où il concurrence l'acier. Les métaux high-tech ont connu un développement rapide de leur consommation avec l'évolution des marchés des technologies de l'information et de la communication.

Le secteur du travail des métaux, réalisant un CAHT de 15,7 Md€ en 2003 et employant 136 100 salariés, est soumis à une très forte concurrence de produits d'importations.

Les enjeux du secteur

Les semi-produits représentent un ensemble de matériaux et de produits chimiques très différents, positionnés sur des marchés très hétérogènes : des matériaux de construction lourds, peu coûteux, destinés exclusivement à des marchés nationaux côtoient les métaux précieux dont les prix très élevés sont fixés par les évolutions de l'offre et de la demande mondiales. Cette situation se

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises*
Sidérurgie	16,4	58,1	138
Métaux non ferreux	7,6	20,8	87
Fonderie	3,6	31,2	216
Travail des métaux	15,7	136,1	2 226
Produits métalliques	12,1	83,8	883
Total métallurgie, transfo. des métaux	59	345,7	3 837

(*) entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries de la métallurgie et de la transformation des métaux - enquête annuelle entreprises 2003 (Sessi - juillet 2005)

traduit par l'existence, pour les différents matériaux et industries concernés, de situations spécifiques vis-à-vis de grands enjeux communs ou largement partagés.

Les enjeux transversaux

Les enjeux qui pèsent sur les semi-produits concernent à la fois les matériaux fabriqués et les procédés de production. L'enjeu le plus directement associé à ce secteur est celui de la préservation des ressources naturelles et du recyclage. Plus largement, tous les enjeux associés à la problématique du développement durable sont concernés : énergie, changement climatique, ressource en eau. Enfin les industries européennes et françaises des semi-produits sont confrontées à la concurrence internationale, et un enjeu fort réside dans le maintien de leur compétitivité. Celle-ci passe notamment, en liaison avec les secteurs utilisateurs, par le développement de matériaux plus performants et/ou présentant de nouvelles fonctionnalités. Aussi le domaine des traitements de surface apparaît primordial pour conférer de nouvelles propriétés à moindre coût.

Ces exigences accrues en matière de performances poussent à la mise au point de produits à plus haute valeur ajoutée. Cette tendance engage les entreprises du secteur dans une démarche d'innovation qui doit être favorable au maintien de la compétitivité de l'industrie des biens intermédiaires.

Les enjeux spécifiques

Matériaux minéraux non métalliques

L'industrie de première transformation des matériaux minéraux nécessite un apport d'énergie important. L'énergie et les émissions de gaz à effet de serre sont l'enjeu majeur pour ce secteur d'activité. L'industrie cimentière et l'in-

dustrie verrière sont particulièrement consommatrices en énergie. Outre ces besoins énergétiques importants, la production de ciment s'accompagne de la production de gaz carbonique de « process », inhérent à la réaction chimique de transformation du cru en ciment non broyé lors de la cuisson. Cet enjeu énergétique pèse directement sur les procédés de production des industries du secteur ; mais leurs produits sont également concernés. L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est en effet un enjeu de premier plan (les bâtiments résidentiels et tertiaires sont le premier poste de consommation énergétique en France) ; cette amélioration passe notamment par l'évolution des performances énergétiques des matériaux pour la construction (bétons, vitrages, isolants...).

À l'échelle mondiale, la préservation des ressources de matières premières de base du secteur n'est pas un enjeu majeur ; mais les industriels du secteur, par exemple les verriers, sont également consommateurs de certains métaux rares, dont l'approvisionnement pose des problèmes importants. Pour les matériaux de construction, la disponibilité de la ressource est un enjeu local très important, dont l'impact économique est réel. En France plusieurs régions sont déficitaires en granulats, constituants des bétons et des chaussées par exemple. L'Île-de-France, l'Alsace ou la région Rhône-Alpes connaissent ainsi une pénurie de granulats naturels. Des régions voisines excédentaires peuvent fournir les compléments nécessaires ; mais le prix du granulat, matériau lourd et peu coûteux, double tous les 50 km en raison des frais de transport. Dans ces régions déficitaires, le recyclage des matériaux de construction est une alternative déjà pratiquée dans certains cas.

Enfin, les produits des industries des matériaux non métalliques doivent faire face aux attentes toujours plus pressantes des secteurs utilisateurs en terme de performances. Ces performances améliorées se traduisent par des exigences croissantes en matière de durabilité, de qualité et également, de plus en plus souvent, de nouvelles fonctionnalités des matériaux. L'exemple le plus marquant de cette évolution sera le développement des matériaux composites et nanocomposites, qui implique l'utilisation d'additifs minéraux toujours plus performants. C'est le cas, par exemple, de l'industrie du papier, utilisatrice de quantités importantes de minéraux (quelque 800 kt/an en France), et en particulier de carbonates. L'évolution des performances de ces charges permet de diminuer la quantité des fibres nécessaires pour la fabrication du papier. Le développement de matériaux plus performants pour répondre aux besoins des industries du papier, des plastiques, de la chimie, etc. est ainsi un véritable enjeu pour les produits de l'industrie minérale.

Papier et bois

La France est bien positionnée en Europe du point de vue de sa ressource forestière. Les surfaces boisées représentent 27 % de la surface du territoire français (35 % en Europe) ; le problème majeur pour l'exploitation de ces surfaces est que la propriété est très morcelée. 65 % du bois français est utilisé dans la construction et la France est le premier pays consommateur de bois-énergie en Europe (9 millions de tonnes équivalent pétrole par an).

Le développement de la filière bois pour le chauffage pourrait contribuer aux enjeux énergétiques et de l'effet de serre et, à plus long terme, la possibilité de transformer la partie ligneuse des

plantes en carburant pourrait faire du bois une énergie primaire pour une part des besoins de transport. Les autres enjeux de la filière bois sont à considérer dans le contexte de la disponibilité des ressources naturelles minérales ou fossiles et de l'emploi. De ce point de vue, il est important de noter que la filière bois peut concerner l'ensemble du territoire.

Enfin, le développement des usages hors énergie et bois d'œuvre doit être poursuivi par l'industrie. Ces activités permettent, en particulier, de positionner les industriels de la transformation du bois sur des applications à forte valeur ajoutée.

Les papetiers évoluent dans le contexte suivant : mondialisation des marchés et développement durable. La mondialisation des marchés et l'internationalisation des entreprises sont deux éléments de contexte très importants pour l'industrie du papier. Les implications peuvent être le départ des centres de décision, mais également le développement de nouvelles structures industrielles qui imposent de nouvelles organisations.

Les trois enjeux clés dans le domaine du papier concernent l'eau, les matières premières et l'énergie. Pour rester compétitifs, les leviers à actionner sont à rechercher dans ces trois domaines. Ces dernières années, la R&D a essentiellement été consacrée à l'amélioration des procédés, notamment du point de vue des consommations (eau, énergie). Désormais, les matières premières apparaissent comme l'enjeu le plus important. Les papetiers doivent développer des produits capables de répondre à de nouveaux usages (propriétés nouvelles, matériaux spécifiques...). Ces développements doivent se faire non seulement à partir de matières premières vierges, mais aussi sur les pro-

duits fabriqués à partir de matières premières recyclées.

Chimie, caoutchouc et plastique

Pour la chimie, les enjeux concernent l'anticipation des impacts environnementaux et sanitaires des produits mais aussi des procédés de fabrication pour limiter les besoins en matières premières, notamment énergétiques. L'enjeu énergétique est particulièrement important pour certaines activités très électro-intensives (électrolyse). Outre les aspects environnementaux, les coûts énergétiques pèsent sur la compétitivité de l'industrie chimique. Pour les produits, certains grands enjeux sont déjà pris en compte par les réglementations au niveau européen. Les directives sur les véhicules hors d'usage (VHU) ou les emballages imposent de mettre en place des filières de récupération et de recyclage des matières plastiques. Le règlement Reach (enRegistrement, Evaluation et Autorisation des substances CHimiques) imposera aux industriels de la chimie de fournir les données de sécurité sanitaire et environnementale de nombre de ces produits.

La mise au point de matériaux fonctionnels est également un enjeu majeur pour l'industrie chimique. La démarche stratégique est ici de vendre une « qualité d'usage » et non plus un produit. Cette stratégie est bien identifiée depuis plusieurs années, mais l'industrie chimique manque de relations directes avec l'utilisateur final pour définir les spécifications fonctionnelles de ses produits. Par ailleurs, l'intensité des dépenses de R&D reste trop faible dans le secteur pour soutenir cette stratégie. Du point de vue économique, la constitution de complexes ou « plates-formes » intégrées, accueillant les chimistes, leurs fournisseurs et leurs clients permettrait de rationaliser les investisse-

ments, diminuer les coûts (transports, ...) et permettrait une gestion plus efficace des risques industriels.

Les grands chimistes ont une présence internationale, et cherchent parallèlement à conserver leurs parts de marché sur les marchés matures (Europe, États-Unis) et à se renforcer sur les marchés en croissance (Asie). La stratégie de ces grands groupes est de consolider les secteurs sur lesquels ils ont des positions de leader et de se désengager des activités sur lesquelles ils sont moins bien positionnés. Si la pétrochimie et la chimie de base sont des secteurs où il est difficile de s'imposer, il reste un rôle à jouer dans la chimie de performance pour l'industrie française. L'avenir des filières de plasturgie semble également lié à une montée en gamme des produits car la concurrence de pays comme la Chine et l'Inde est de plus en plus prégnante sur les produits de base.

Métaux et produits métalliques

Les enjeux économiques sont particulièrement importants pour les métaux et les produits métalliques. Ces enjeux s'expriment différemment et à des échéances variables, mais touchent désormais tous les métaux, qu'ils soient de base ou de « haute technologie ».

Pour l'acier, les enjeux économiques à l'échelle mondiale se sont révélés ces dernières années avec la très forte poussée de la demande asiatique, en particulier chinoise. Cela a entraîné un équilibre nouveau entre l'offre et la demande mondiales d'acier.

Pour les métaux de haute technologie, les tensions liées aux déséquilibres entre offre et demande sont plus anciennes et se traduisent par des variations importantes des coûts de matières premières. Cette situation est exacerbée depuis quelques années par la très forte croissance des applications dans

les technologies de l'information et de la communication. Dans ce cadre, les crises en cours concernent notamment le sélénium (verres spéciaux), le cobalt (accumulateurs nickel - hydrures de métal et lithium - ion) et surtout l'indium (écrans plats à cristaux liquides). À l'horizon 2010, le gallium pourrait également être concerné (diodes à lumière blanche, lasers « blu-ray » pour DVD haute définition, ...). Au-delà, l'essor des piles à combustibles à membranes échangeuses de protons (type PEM) pourrait, par exemple, se traduire par une crise sur le platine.

La compétition entre matériaux (dont celle entre les métaux) se traduit par des exigences toujours plus élevées en matière de performances, mais également en matière de coût. L'objectif est l'utilisation de matériaux qui permettent d'obtenir les pièces les moins coûteuses : soit parce que le matériau est lui-même moins coûteux, soit parce que la quantité de matière nécessaire est plus faible, soit parce qu'il permet l'utilisation de procédés de transformation plus économiques. De ce point de vue, la mise au point de nouveaux matériaux métalliques répond aux enjeux de compétitivité auxquels doit faire face l'industrie française qui dispose d'atouts dans le domaine des traitements de surface des métaux (notamment grâce au nucléaire).

Au-delà de ces enjeux économiques, les métaux sont également concernés par les grands enjeux sociétaux, notamment en matière de sécurité et de développement durable. Sur ce dernier point, les aspects liés aux consommations énergétiques et aux émissions de gaz à effet de serre concernent aussi bien la production des métaux et des produits métalliques que leur usage (notamment dans les moyens de transport).

Les tendances d'évolution du secteur

En matière d'usages

Les considérations sur les tendances en matière d'évolution des usages des matériaux sont d'une importance cruciale. Les propriétés de structures des matériaux restent un élément de choix, mais d'autres fonctionnalités sont désormais recherchées : légèreté, transparence, résistance au feu, à la corrosion, conduction électrique..., mais également toucher, aspects de surface...

Ces évolutions répondent à une complexification des cahiers des charges des applications des matériaux. À terme, l'évolution prévisible est la spécialisation extrême de matériaux destinés à des marchés de niches. Les impacts sont à la fois la mise au point de nouveaux matériaux, mais également de nouveaux procédés de transformation ou de traitement de surfaces.

Le choix d'un matériau devient donc un compromis entre les principales performances recherchées, ses éventuelles autres fonctionnalités, son coût et son aptitude à la mise en œuvre. Dans certains cas, parce que soit la réglementation soit le marché l'imposent, la capacité au recyclage devient également un critère de choix d'un matériau.

Les tendances technologiques

Matériaux minéraux non métalliques

Du point de vue des enjeux énergétiques, une des tendances technologiques importantes pour les industries du verre et du ciment (et de l'acier) est la constitution de « plates-formes énergétiques ». Sur ces sites industriels sont rassemblés les producteurs d'énergie, les gros consommateurs et des utilisateurs susceptibles de valoriser la cha-

leur disponible. La mise en place de telles plates-formes est un sujet de réflexion important au niveau international pour les industries du verre, de l'acier et du ciment. Ces logiques s'inscrivent dans ce que l'on qualifie de thermoéconomie, voire d'écologie industrielle. Les technologies concernées sont des technologies « socio-organisationnelles » plutôt que des technologies « dures ».

Du point de vue des propriétés des matériaux, les tendances technologiques du secteur concernent :

- le développement de matériaux fonctionnels, par exemple des bétons capables de répondre à des usages particuliers (les bétons autonettoyants, développés notamment au Japon et en Italie, en sont un exemple) ;
- les matériaux intelligents : matériaux capables de « signaler » qu'ils sont endommagés, matériaux autocicatrisants... ;
- les matériaux techniquement plus durables.

Au cours des dernières années, des formulations de bétons à performances optimisées ont été mises au point. Des évolutions technologiques restent nécessaires, par exemple concernant leur tenue au feu ; mais le point clé est désormais de développer l'usage de ces bétons sur chantiers, en prenant en compte les spécificités qu'ils imposent du point de vue de leur mise en œuvre.

Papier et bois

Pour les papetiers, en ce qui concerne l'énergie, les évolutions vont se faire en partenariat avec les fournisseurs d'énergie. Le développement de la Chine va créer des instabilités au niveau de l'approvisionnement en ressources énergétiques. Les papetiers sont amenés à se préoccuper de ces aspects, et à travailler sur l'optimisation du séchage, sur la

conception de nouveaux procédés plus économes...

Les aspects qui touchent à la matière première sont plus « fondamentaux ». De nombreux travaux sont nécessaires dans ce domaine, y compris pour ce qui concerne l'association des matières premières et des matières recyclées. Le rôle des nouveaux matériaux, dont les nanomatériaux, est important, en particulier pour l'amélioration des propriétés de la matière recyclée (ou par exemple des nanotubes de carbone pour conférer au papier une conduction électrique). Une autre tendance technologique est le développement des applications en emballage associant papier et chimie verte pour les nouveaux usages des papiers-cartons (exemple de l'association de déchets de betterave micronisés et de cellulose).

Dans ce contexte, l'atout principal de l'industrie papetière française repose sur son expertise en matière de recyclage et de recyclabilité. Pour ce qui est des technologies « traditionnelles » de fabrication des pâtes à partir de matière première « vierge », la France est en retrait, notamment par rapport aux pays d'Europe du Nord.

Les applications comme bois d'œuvre représentent environ 50 % de la consommation de bois en France. Le bois est un matériau hétérogène par nature, et le développement des technologies de contrôle non destructif (CND) devrait contribuer à mieux faire correspondre les applications en fonction de la qualité des matériaux.

L'utilisation du bois pour l'énergie doit être envisagée quand la valorisation matière n'est pas possible. Le gisement « théorique » d'énergie représenté par le bois est élevé, mais il faut le distinguer du gisement économiquement mobilisable (viabilité économique pour des transports inférieurs à 25 km). L'uti-

lisation du bois dans la production de biocarburants est un autre axe de développement.

La filière bois micronisé permet de valoriser des « déchets » en matériaux plus homogènes. Le développement des techniques plasturgistes pour le bois micronisé représente une nouvelle tendance technologique. On sait désormais extruder des matériaux contenant jusqu'à 70 % de bois, pour de nouveaux usages (fabrication de profilés pour le bâtiment, par exemple). Aux États-Unis, la transformation du bois selon ces techniques représentait une production de 800 000 tonnes en 2004, et une croissance annuelle qui avoisinait les 25 % par an. Une autre application de « composites » bois-plastique touche les intérieurs automobiles. Dans ce cas, un des atouts du bois est la stabilité du prix de la matière par rapport au prix cyclique du plastique.

Le traitement de surface du bois est également une tendance technologique. Le plasma froid permet, par exemple, de traiter chaque fibre pour fonctionnaliser les produits (propriétés bactéricides...). Le traitement plasma de palettes de bois permet également de les rendre imputrescibles.

L'utilisation de ressources ligno-cellulosiques comme matière première de la « chimie durable » est également une tendance importante. Le bois devient alors une matière première de la chimie des colles ou de la fabrication des fibres textiles. Le développement des technologies enzymatiques pour la transformation du bois et du papier est une tendance forte. Les principales contraintes liées à la cinétique plus lente de ces procédés tendent à être corrigées. Dans ce cadre, la mise en œuvre d'une voie de dégradation enzymatique de la lignine et de la cellulose est un enjeu technologique important pour l'industrie du papier.

C'est une problématique mondiale qui a des répercussions importantes en matière économique et énergétique.

Chimie, caoutchouc, plastique

Les tendances technologiques à moyen terme sont identifiées notamment dans les travaux de la plate-forme européenne SusChem, ainsi qu'en France dans le rapport du groupe de réflexion stratégique présidé par le député D. Garrigue (Avenir de l'industrie chimique en France à l'horizon 2015, mai 2005). La tendance lourde à l'horizon 10 à 15 ans correspond à l'application du concept de développement durable à l'industrie chimique. Ceci a conduit, au début des années 1990, à l'apparition du concept de *green chemistry* ou chimie durable (préférable en français à chimie verte) dont la définition, acceptée par tous, est la suivante : « La conception, le développement et l'utilisation de produits chimiques et de procédés pour réduire ou éliminer l'usage ou la formation de substances dangereuses et/ou toxiques pour la santé et l'environnement. » Elle s'appuie sur douze principes qui se résument en quatre propositions :

- préparer des produits respectueux de l'environnement (matières premières renouvelables si possible) ;
- concevoir des procédés propres et optimisés ;
- travailler dans des conditions énergétiques optimisées ;
- suivre en temps réel les réactions chimiques grâce à une instrumentation analytique performante.

Dans ce cadre, trois tendances technologiques prioritaires se dégagent à moyen terme pour l'industrie chimique : la catalyse et les procédés ; les biotechnologies industrielles ; la chimie analytique.

Ces tendances font apparaître des

préoccupations essentiellement dirigées vers l'amélioration des procédés de production. Cependant, l'évolution des procédés catalytiques ou le développement des biotechnologies industrielles doivent se traduire également par une amélioration de la qualité des produits.

Métaux et produits métalliques

L'innovation technologique pour les métaux de base est largement tirée par les applications dans le domaine des transports. Les tendances technologiques répondent donc aux grands enjeux du domaine : l'énergie et la sécurité. Un des principaux objectifs est la mise au point de structures allégées, présentant des performances mécaniques améliorées et ce en réduisant les coûts.

L'acier, concurrencé par l'aluminium et les composites, innove dans le domaine de l'industrie automobile : un des axes technologiques est la mise au point de matériaux associant les aciers et les polymères pour bénéficier des avantages de chacun des matériaux ; plus généralement, l'innovation porte sur le développement de nouvelles structures et techniques d'assemblages (nids d'abeilles, stratifiés, sandwichs...). Un

autre axe est le développement d'aciers au manganèse, présentant simultanément une résistance et une ductilité élevées. Une conséquence est l'utilisation d'une plus large gamme de nuances d'aciers spécifiques, adaptés à chaque fonction.

Pour l'aluminium, les innovations concernent également l'automobile et l'aéronautique, où les matériaux composites sont désormais très concurrentiels. L'allègement est également un des axes de développement fort, en cherchant à améliorer les propriétés mécaniques des produits. Dans ce cadre les travaux portent non seulement sur la mise au point de nouveaux alliages, mais également sur de nouvelles méthodes d'assemblage.

Pour répondre aux attentes de matériaux mieux adaptés à leurs usages, les traitements de surfaces restent une voie de développement technologique importante. Les nouveaux procédés utilisés doivent, par ailleurs, présenter un impact moindre sur l'environnement.

Parallèlement, le développement de procédés de production moins consommateurs d'énergie est un axe important dans le domaine des métaux de base. Ainsi, dans le domaine de l'acier, des tra-

vaux en cours concernent la mise au point de procédés faiblement émetteurs de CO₂. Les principales pistes explorées sont la réduction du minerai de fer par l'hydrogène ou par électrolyse et le piégeage du CO₂.

Le recyclage est également une tendance forte dans le domaine des métaux. Les techniques sont éprouvées pour ce qui concerne l'acier et l'aluminium. Des évolutions sont cependant nécessaires pour permettre l'obtention de matières premières secondaires de meilleure qualité permettant leur utilisation dans la fabrication de produits toujours plus élaborés. Les nouveaux enjeux concernent les métaux de haute technologie : les tensions sur ces marchés appellent au développement de leur recyclage. Mais le principal frein à ce développement vient de la très grande dispersion des gisements : les produits à recycler sont de plus en plus miniaturisés et contiennent de très nombreux métaux en quantités très faibles. Les évolutions technologiques doivent dans ce cas être accompagnées de modifications dans l'organisation des filières (collecte...).



18. Matériaux nanostructurés et nanocomposites

Description

Une définition désormais largement répandue retient qu'un nanomatériau est composé ou constitué de nano-objets, dont la taille est comprise entre 1 et 100 nanomètres, qui présentent des propriétés spécifiques de l'échelle nanométrique. Les nano-objets sont des particules, fibres ou tubes, qui peuvent être utilisés en tant que tels. Mais on considère plus particulièrement ici deux classes de matériaux incorporant ces nano-objets :

- les matériaux nanostructurés : ceux-ci peuvent être nanostructurés en surface, dans ce cas les nano-objets constituent des éléments de revêtements de surface, ou en volume, les nano-objets sont alors les éléments de matériaux massifs dont la structure intrinsèque nanométrique (porosité, réseau nanocristallin...) leur confère des propriétés physiques spécifiques. Parmi ces matériaux, on trouve les nanopoudres ;
- les nanocomposites : dans ce cas les nano-objets sont incorporés ou produits dans une matrice, pour apporter une nouvelle fonctionnalité ou modifier les propriétés physiques. La matrice peut être constituée de polymères thermoplastiques, de papier, d'acier, de verre... Les propriétés spécifiques des nanomatériaux sont multiples : physiques, magnétiques, mécaniques, optiques, électriques, chimiques, thermiques, tribologiques. Ces propriétés spécifiques découlent notamment de deux caractéristiques des nano-objets, conséquences de leur très faible taille : la quasi-absence de défauts et le fort rapport entre les dimensions de surface et de volume. Par ailleurs, du fait de leurs très faibles dimensions, les nano-objets ont également des propriétés très différentes des matériaux massifs dans les domaines optique, électrique, magnétique, etc.

L'émergence de ces matériaux a été largement encouragée par les progrès des méthodes d'observation, qui doivent être poursuivies. Le développement des nanomatériaux passe encore par la résolution de nombreux défis sur les plans scientifique et technique : compréhension et maîtrise des mécanismes fondamentaux à l'échelle nanométrique ; procédés de fabrication ; impacts, notamment sanitaires... Pour ce qui est des procédés de fabrication, deux aspects sont à distinguer :

- la fabrication des nano-objets (nanocharges...) : dans ce cas, l'élément clé est la mise au point de procédés compatibles avec une production industrielle sécurisée. De ce point de vue, les enjeux sont différents entre les nano-objets synthétiques (nanotubes de carbone...) et naturels (argile, mica, calcaire...) ;
- dans ce cas de l'élaboration des nanomatériaux, le point clé est la maîtrise de la structuration des nano-objets (matériaux nanostructurés) ou de leur répartition optimale dans les matrices (nanocomposites). La production de composites homogènes reste un verrou de l'industrialisation des composites en général.

Les capacités des moyens de simulation et de modélisation deviennent compatibles avec la taille des nano-objets : leur développement bénéficiera de la maîtrise de ces moyens.

Un frein important au développement des nanomatériaux est la diversité des acteurs impliqués. Il existe peu de relations entre les experts capables de mettre au point de nouveaux nano-objets et de les intégrer à des matériaux plus complexes, et les industriels des nombreux secteurs susceptibles d'être intéressés.

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Matériaux - chimie

Par ailleurs, le développement de ces technologies doit concilier le renforcement de la compréhension des aspects fondamentaux associés et la mise au point de matériaux dont les fonctionnalités répondent aux besoins du marché.

Enjeux, Impact

La large gamme des propriétés des matériaux nanostructurés et des nanocomposites les destine à de très nombreuses applications qui répondent aux enjeux socio-économiques des prochaines décennies.

En matière de développement durable, l'incorporation de nano-objets permet d'obtenir des matériaux aux propriétés améliorées en utilisant moins de matière que les matériaux conventionnels. L'allègement des matériaux à performances mécaniques constantes a pour conséquence de réduire les consommations des moyens de transport sans dégrader leur sécurité, voire en la renforçant. Par ailleurs, les nanomatériaux permettent d'obtenir des systèmes de production d'énergie plus performants, accompagnent le développement des énergies propres et favorisent les économies d'énergie.

Les nanomatériaux contribuent à augmenter la qualité et à développer les fonctionnalités des produits de nombreux secteurs industriels. Ces innovations techniques sont reconnues comme un des leviers les plus efficaces pour maintenir la compétitivité de ces industries.

On sait répondre à plusieurs des grands enjeux socio-économiques en mettant au point des matériaux plus performants. Il est également crucial de vérifier que les nanomatériaux n'ont pas d'impacts négatifs vis-à-vis de ces enjeux. En matière de sécurité et de santé, les effets des nanomatériaux sont d'ores et déjà étudiés par les scientifiques et les industriels. Les enjeux sont très importants, et peuvent être appréciés, a posteriori et probablement à une échelle moindre, par l'observation actuelle des situations dans le domaine de l'amiante. Ces aspects doivent influencer très largement le développement des nanomatériaux, par exemple en privilégiant les voies de synthèse les moins nocives pour la santé des travailleurs.

Marché

La gamme étendue des propriétés nouvelles ou améliorées conférées par l'incorporation des nano-objets a des conséquences sur la multitude des marchés concernés : environnement, énergie, textile, chimie, automobile, aéronautique et spatial, bâtiment, caoutchouc et plastiques, métallurgie, technologies de l'information et de la communication...

Quelques exemples d'application sont indiqués ci-après : les céramiques nanoporeuses pour la filtration de l'eau ou de l'air ; les matériaux pour électrodes ou électrolytes des piles et batteries (dont les piles à combustible) ; les matériaux pour fibres optiques ; les polymères conducteurs ; les papiers plus résistants ; les bétons et vitrages autonettoyants...

La Commission européenne a estimé que le marché mondial des nanotechnologies en 2001 était légèrement supérieur à 40 Md€. En 2008, le marché global des produits issus des nanotechnologies devrait atteindre plus de 700 Md€. Le marché des nanomatériaux est estimé à 340 Md\$ par an à l'horizon 2015. Il représenterait un tiers du marché global des nanotechnologies. On estime qu'à l'horizon 2015, plus de 2 millions de personnes dans le monde auront une activité dans le domaine des nanotechnologies entraînant, en conséquence, un besoin croissant de formation à tous les niveaux. Le marché américain des nanomatériaux a été évalué à 109 M€ en 2000. Dès 2007, celui-ci devrait atteindre 900 M€ et 30 Md€ en 2020.

Le marché mondial des nanoparticules pour des applications biomédicales, pharmaceutiques et cosmétiques a été estimé à 85 M€ en 2000 et devrait atteindre 126 M€ en 2005, soit un taux de croissance annuel moyen de 8,3 %. Il s'agit du marché représenté par les particules inorganiques utilisées pour produire des agents antimicrobiens, des marqueurs biologiques pour la recherche et le diagnostic, des procédés de séparation biomagnétiques, des vecteurs d'administration de médicaments, des milieux de contraste pour l'imagerie à résonance magnétique, des dispositifs orthopédiques et des écrans de protection solaire.

Le marché mondial des nanoparticules pour des applications liées à l'énergie a été

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements mécaniques ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; industrie textile ; industrie du papier et du carton ; chimie, caoutchouc, plastiques ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de composants électroniques ; bâtiment ; travaux publics.

estimé à 54,5 M€ en 2000 et devrait atteindre 77 M€ en 2005, soit un taux de croissance annuel moyen de 7 %. Ce marché est porté par la prise de conscience de l'importance de la protection de l'environnement. Les nanoparticules sont utilisées en tant que supports de catalyse dans l'industrie automobile, membranes céramiques, piles à combustibles, photocatalyse, propulseurs et explosifs, revêtements antirayures, céramiques structurales, revêtement par vaporisation thermique.

La production annuelle mondiale des nanocomposites quant à elle se limite actuellement à quelques milliers de tonnes, principalement pour la câblerie et l'emballage. Mais en 2010, on s'attend à ce que cette production passe à 500 000 tonnes par an. Des marchés ont été identifiés dans les secteurs des transports, de l'ingénierie et de la haute technologie grâce aux propriétés de ces matériaux qui permettent l'allègement, le renfort des structures et une conception différente des pièces avec, par exemple, la possibilité de travailler sur la réduction d'épaisseur. Dans le cas particulier des nanocomposites polymères, le marché devrait représenter, en 2008, 36 000 tonnes, soit une valeur de 211 M\$.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie analytique, chimie moléculaire, chimie du solide, matériaux, optique, physique des milieux dilués, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : optique, analyse, mesure et contrôle, chimie macromoléculaire, traitements de surface, matériaux - métallurgie.

■ Pôles de compétitivité : Minalogic (Rhône-Alpes), Mipi (Lorraine), Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes).

Un des projets de coopération du pôle Mipi (Matériaux innovants - Produits intelligents) traite des « nanomatériaux et des alliages complexes ». Le pôle Chimie-environnement Lyon consacre une partie de ses travaux aux thermoplastiques renforcés de nanocharges. Minalogic traite des matériaux pour les nano-

technologies. Les nanomatériaux touchent également les activités d'autres pôles (Pôle plasturgie, Techtera,...).

■ Liens avec (technologies): textiles techniques et fonctionnels, architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules, gestion de la microénergie, matériaux pour l'électronique et la mesure, fonctionnalisation des matériaux, micro et nanocomposants, nouveaux procédés de traitement de surface, procédés de mise en forme de matériaux innovants.

■ Principaux acteurs français : une base de données des acteurs français des nanomatériaux est accessible en ligne à l'adresse www.nanomateriaux.org

Centres de compétences : CEA, Ineris, LCCFP (Toulouse), NRG (Belfort) ... La liste des laboratoires impliqués dans le domaine des nanomatériaux fonctionnels peut être identifiée à l'adresse www.nanomat.fr

Industriels : Arkema, DG TEC, Marion Technologies, Nanoledge.

Le projet européen Nanosafe2, qui traite des effets sur la santé des procédés de production des nanomatériaux, associe notamment plusieurs partenaires français : Arkema, DG TEC, Ecrin, CEA, Ineris, Inserm.

Les nanomatériaux sont concernés par les activités du Réseau national matériaux et procédés (RNMP), et du Réseau de recherche en micro et nanotechnologies (RNMT).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Conoco Philips (États-Unis), CNI (États-Unis), Hyprion (États-Unis), Nanocyl (Belgique), Mitsui (Japon), Showa Denko (Japon), Sumitomo (Japon) ...

Commentaires

La France compte peu d'acteurs concernés directement par la production de nano-objets, comme Arkema ou Nanoledge dans le domaine des nanotubes de carbone. Les acteurs engagés dans les matériaux nanostructurés ou les nanomatériaux sont plus difficiles à identifier et susceptibles d'être présents dans de nombreux secteurs d'activité. De grands groupes industriels sont concernés tels Arcelor, Lafarge, Saint Gobain...

Matériaux - chimie



19. Matériaux pour l'électronique et la mesure

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Ces matériaux regroupent les matériaux utilisés dans la fabrication des composants électroniques ainsi que des capteurs. Le silicium sera, à l'horizon 2010 et probablement au moins jusqu'à 2020, le principal matériau utilisé dans ces applications. Parallèlement l'utilisation d'autres matériaux devraient se développer tels que :

- les polymères électroniques : les applications de ces matériaux organiques sont notamment les écrans et les étiquettes radiofréquence (RFID) flexibles. Les polymères concernés doivent avoir les propriétés électroniques adéquates pour former les couches semi-conductrices et isolantes des transistors. Outre la possibilité de fabriquer des produits souples, les dispositifs utilisant des polymères électroniques pourraient présenter l'avantage d'être fabriqués avec des techniques de fabrication moins coûteuses (impression jet-d'encre) ;
- les matériaux magnétiques : les applications dans le domaine de l'électronique et de la mesure sont le stockage des données (disques durs et mémoires MRam pour *Magnetic Random Access Memory*), la conception d'actionneurs électromagnétiques (en remplacement de dispositifs hydrauliques ou pneumatiques) ou de capteurs. On recherche des matériaux qui conservent leurs propriétés magnétiques près de leur température de Curie, et qui soient moins sensibles à la micro-oxydation ; des nano-composites combinant des magnétiques durs et mous ont également un intérêt ; par ailleurs les matériaux candidats doivent être plus durables et permettre la réalisation, avec précision, de composants miniaturisés ;
- les matériaux permettant l'électronique de spin : les principales applications sont le

stockage de données ou la transmission d'informations (commutateurs pour les télécoms). Le principe est ici d'utiliser à la fois la charge et le spin des électrons. Ceci est possible en combinant des matériaux semi-conducteurs et ferromagnétiques, ou en utilisant des semi-conducteurs ferromagnétiques. Dans ce deuxième cas, le challenge est la mise au point de matériaux semi-conducteurs qui soient ferromagnétiques à température ambiante et qui conservent les propriétés observées jusqu'à présent à basse température ;

- les matériaux ferroélectriques : ces matériaux sont essentiellement utilisés pour leurs propriétés dérivées : la pyroélectricité pour la réalisation de capteurs thermiques, la piézoélectricité pour la réalisation de capteurs et d'actionneurs mécaniques (accéléromètres, capteurs de pression, ...). Leurs propriétés électro-optiques sont mises à profit pour la réalisation de multiplexeurs et de modulateurs optiques. Une autre application importante des matériaux ferroélectriques est les mémoires Ram (*Random Access Memory*). Du point de vue des matériaux, les travaux nécessaires concernent les matériaux nanostructurés, les hybrides organiques-inorganiques et une compréhension plus poussée des matériaux actuels ;

- les matériaux pour microélectronique III-V : il s'agit de semi-conducteurs tels que AsGa (arséniure de gallium), InP (phosphore d'indium) et de composés ternaires de type AsGaAl (arséniure de gallium et d'aluminium). Les applications spécifiques de ces matériaux sont les amplificateurs de puissance pour la téléphonie mobile ou les circuits de commande pour les communications optiques à très haut débit. Certains nitrures sont utilisés dans des diodes élec-

troluminescentes comme sources de lumière blanche à haut rendement. Les développements nécessaires concernent l'optimisation des technologies de croissance pour les applications industrielles, un meilleur contrôle de la qualité des interfaces dans les super-réseaux et la mise au point de matériaux monocristallins ;

- les nanotubes de carbone : en fonction de la position des atomes de carbone, on obtient des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs. En raison de leur faible taille et de leurs propriétés électriques variables, les nanotubes de carbone apparaissent comme des matériaux candidats au remplacement des matériaux actuels. On pourrait ainsi disposer plus de transistors sur un même circuit intégré et donc augmenter la puissance des puces utilisées. Des premiers exemples de transistors moléculaires à base de nanotubes de carbone semi-conducteurs ont déjà été proposés.

Au-delà de leur variété, il convient de souligner les différences dans les stades de développement des technologies présentées. Les matériaux ferroélectriques ou pour la microélectronique III-V ont ainsi atteint une certaine maturité. Les travaux sur les matériaux magnétiques, pour l'électronique de spin ou les polymères électroniques sont actuellement très nombreux. Enfin, l'horizon pour les applications des nanotubes de carbone en électronique se situe au-delà de 2010.

Des verrous économiques importants existent pour plusieurs de ces matériaux. La rareté de certains métaux, combinée à une demande en forte croissance, a des conséquences très significatives en terme de coût des matières premières. Au-delà de ces aspects économiques, la disponibilité de certains matériaux sera difficile à assurer.

Enjeux, Impact

Les enjeux de ces technologies alternatives sont de préparer la substitution des semi-conducteurs à base de silicium massif. Cette substitution sera progressive dans les applications pour lesquelles les performances du silicium seront surpassées. Les experts estiment que les technologies silicium seront encore prépondérantes en 2020.

Un enjeu pour les acteurs français de la

microélectronique est de conserver une expertise forte sur ces sujets.

Certaines des technologies présentées ont par ailleurs des impacts directs en terme de compétitivité ; ainsi on estime qu'un site de production de puces en polymère coûterait moins de 35 M\$, alors qu'une usine de fabrication de semi-conducteurs vaut entre 2 et 4 Md\$.

Marché

Le marché de ces matériaux est celui de l'électronique et des capteurs, qui touche de très nombreux domaines d'activités en aval. Certains de ces domaines sont particulièrement moteurs pour le développement des technologies : technologies de l'information et de la communication, aéronautique et espace, défense, automobile... Les applications sont également très larges : stockage de données (disques durs et mémoires), écrans et éclairage, RFID, capteurs mécaniques, de température...

En 2004, le marché mondial des semi-conducteurs a atteint 213 Md\$; il devrait atteindre 309 Md\$ en 2008. Il est aujourd'hui largement dominé par la technologie silicium. L'essor de technologies alternatives est attendu dans les prochaines années. Par exemple, le marché des mémoires magnétiques (MRam) devrait croître fortement pour atteindre 2,8 Md\$ en 2008 et 16,1 Md\$ en 2012 ; le marché de l'électronique plastique, évalué actuellement à 70 M\$ pourrait représenter 5,8 Md\$ en 2009.

Acteurs

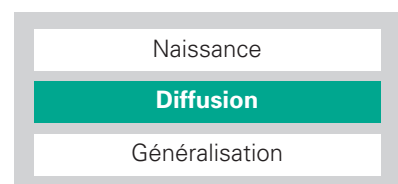
■ Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie analytique, chimie moléculaire, chimie du solide, matériaux, physique théorique, optique, physique des constituants élémentaires, génie des matériaux, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, traitements de surface, matériaux - métallurgie, spatial - armement.

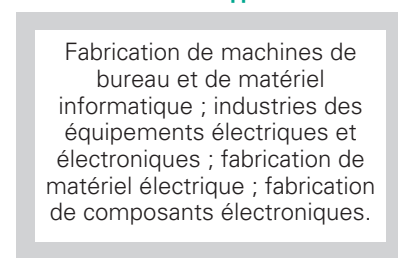
■ Pôles de compétitivité : Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), System@tic (Île-de-France), Minalogic (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents,

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Matériaux - chimie

gestion de la microénergie, processeurs et systèmes, RFID et cartes sans contact, stockage de l'information numérique, affichage nomade, matériaux nanostructurés et nanocomposites, capteurs intelligents et traitement du signal, micro et nanocomposants, procédés et systèmes de photonique, composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : IEMN (Lille), Leti (Grenoble), LAAS (Toulouse), LPN (Marcoussis), Spintec (CEA - CNRS - Grenoble)...

Industriels : Alcatel-Thales III-V Lab, Crocus Technology, Picogiga (Soitec), Soitec, Spintec, STMicroelectronics, Thomson...

Outre les pôles de compétitivité, les acteurs technologiques français sont regroupés autour de plusieurs initiatives nationales ou européennes, notamment : Minatec autour de Grenoble (www.minatec.com), le Réseau

micro-et nanotechnologies (RMNT- www.rmnt.org).

■ Exemples d'acteurs dans le monde :

Microélectronique : Intel (États-Unis), Toshiba (Japon), Samsung (Corée du Sud), Texas Instruments (États-Unis), NEC (Japon), Freescale (États-Unis), Hitachi (Japon), Infineon (Allemagne), Philips Semicondustor (Pays-Bas)...

Électronique plastique : Freescale (États-Unis), Hewlett Packard (États-Unis), Infineon (Allemagne), Eastman Kodak (États-Unis), Opticom (Norvège), Polymer Vision (Philips-Pays-Bas), Xerox (Japon)...

Magnétique et électronique de spin : Canon Anelva (Japon), Cypress (États-Unis), Despatch (États-Unis), Freescale (États-Unis), IBM (États-Unis), Infineon (Allemagne), Micromem (États-Unis), NEC (Japon), Toshiba (Japon)...



20. Procédés catalytiques

Description

La catalyse améliore la vitesse et la sélectivité des réactions chimiques, ou permet la réalisation de réactions dans des conditions optimisées (température, pression, ...). On considère ici l'ensemble des technologies de la catalyse : fabrication des catalyseurs, mise en œuvre des procédés catalytiques, régénération ou élimination... Les technologies de catalyse sont nombreuses : catalyse homogène, catalyse hétérogène, catalyse enzymatique (biocatalyse), photocatalyse, électrocatalyse...

L'intérêt de la découverte de nouveaux catalyseurs reste important pour de nombreuses applications : polymérisations, réactions stéréospécifiques, reconversion de « grosses » molécules en matières de base (exemple du recyclage chimique des plastiques), traitement des gaz... En chimie, la mise au point de nouveaux catalyseurs permet l'accès à de nouvelles matières premières :

- les matières premières renouvelables, par le développement de la biocatalyse ;
- les dérivés du gaz naturel et les alcanes ; on peut ainsi envisager la valorisation matière de composés tels que le propane ou le butane, mais surtout le développement de la chimie du méthane.

Une des applications les plus importantes des catalyseurs est la dépollution des effluents gazeux, notamment pour les émissions des véhicules. Dans ce domaine, la mise au point de nouveaux catalyseurs est importante, et les travaux concernent non seulement les espèces actives (métaux, composés organométalliques...), mais également les supports de catalyseurs (mésoporeux, nanoporeux...).

L'amélioration des procédés catalytiques apparaît également comme un enjeu impor-

tant. Les évolutions attendues concernent, notamment, le couplage des réactions catalytiques avec d'autres réactions ou avec des étapes de séparation. L'optimisation des conditions de réactions catalytiques est également cruciale dans le domaine de la dépollution (pots catalytiques,...). Les évolutions concernent à la fois la conception des réacteurs et la réalisation des unités industrielles. Ces développements doivent, en particulier, se faire dans le contexte de l'intensification des procédés de production. La régénération des catalyseurs permet de valoriser et d'économiser des matériaux dont les prix peuvent être élevés et les ressources limitées (métaux précieux notamment).

Enfin, la fabrication de produits finis comportant des catalyseurs est également un des axes de développement de ces technologies (verres et bétons autonettoyants, par exemple).

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.

Enjeux, Impact

L'utilisation des catalyseurs pour remplacer les procédés stœchiométriques (pour lesquels tous les constituants, réactifs ou non, sont introduits en quantités comparables) est un des douze principes qui ont conduit à la définition de la chimie durable. Une des conséquences directes de l'utilisation des catalyseurs est la diminution des déchets produits par l'industrie chimique. Sur le plan environnemental, les procédés catalytiques

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Matériaux - chimie

permettent la réalisation des réactions dans des conditions optimisées, notamment en terme de consommation énergétique. Par leurs applications environnementales, les catalyseurs contribuent à la limitation des émissions des polluants atmosphériques.

Les procédés catalytiques favorisent globalement la compétitivité de l'industrie chimique : amélioration de la productivité des sites, des rendements de synthèse, diminution des coûts liés à l'énergie et aux traitements des déchets...

Les contraintes environnementales auxquelles sont soumis les secteurs industriels français sont identifiées comme des facteurs qui pèsent sur la compétitivité de ces secteurs. Le développement de procédés de traitements des pollutions performants du point de vue économique est donc un enjeu. Les applications environnementales des procédés catalytiques doivent être considérées dans ce contexte.

L'importance des impacts du développement des procédés catalytiques est soulignée par le choix de la catalyse comme un des trois axes technologiques du pôle à vocation mondiale « chimie environnement Lyon Rhône-Alpes » (Axelera).

Marché

Le marché de la catalyse se répartit sur les grands segments suivants :

- polymères et produits chimiques : la fabrication de plus de 80 % des produits chimiques dépend de réactions catalytiques ;
- protection de l'environnement : traitement des émissions gazeuses des sources fixes (industrie) et des véhicules (pots catalytiques), traitement des eaux ;
- énergie : raffineries.

On peut estimer le marché mondial actuel des catalyseurs entre 12 et 13 Md\$. Ces chiffres ne tiennent pas compte des développements réalisés en interne par les grands groupes chimiques. Ceux-ci sont très importants, une part significative des catalyseurs pour l'industrie chimique est, en fait, produite par les utilisateurs eux-mêmes. D'après la *North American Catalysis Society*,

les polymères et produits chimiques représenteraient 43 % du marché, l'environnement 35 % et le raffinage 22 %. Le marché de la catalyse reste dynamique. Ainsi dans les domaines de l'environnement et de l'énergie, le taux de croissance annuel moyen du marché de la catalyse devrait atteindre près de 13 % par an jusqu'en 2009.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, chimie physique, chimie analytique, chimie moléculaire, chimie du solide, matériaux, physique des milieux dilués, génie des procédés, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, chimie organique, chimie de base, traitements de surface, matériaux - métallurgie, biotechnologies, pharmacie - cosmétiques, environnement - pollution, procédés thermiques.

■ Pôles de compétitivité : Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : moteurs à pistons, biotechnologies industrielles, micro-technologies pour l'intensification des procédés.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : IFP, IRC (Lyon), Laboratoire de catalyse de Lille, Lacco (Poitiers), LMCCCO (Montpellier)...

Industriels : Axens, Arkema, Ceca, Eurecat, Rhodia, Technip, Total.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Degussa (Allemagne), Engelhard (États-Unis), Johnson Matthey (Royaume-Uni)...

Commentaires

Le positionnement de la catalyse sur les deux grands marchés que sont l'industrie chimique et l'environnement justifie le choix du pôle Axelera d'en faire un de ses trois axes thématiques stratégiques.

La France bénéficie d'un fort potentiel scientifique sur le sujet, ainsi que des groupes industriels leaders sur certains des marchés utilisateurs (PSA Peugeot Citroën et Renault dans l'automobile, Suez et Veolia dans l'environnement, Total dans l'énergie).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ; fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien ; industrie automobile ; chimie, caoutchouc, plastiques ; production de combustibles et de carburants ; captage, traitement et distribution d'eau.



21. Biotechnologies industrielles

Description

Les biotechnologies industrielles, ou biotechnologies « blanches », sont l'application de la biotechnologie pour les procédés et la production de produits chimiques, de matériaux et d'énergie. Elles consistent en la mise en œuvre des catalyseurs et réacteurs biologiques que sont les enzymes et les micro-organismes pour ces productions. Les réactions correspondantes ont lieu à des températures généralement proches de la température ambiante, avec comme conséquence des consommations d'énergie réduites par rapport aux procédés traditionnels de l'industrie chimique. Par ailleurs, les réactions sont conduites dans l'eau plutôt que dans des solvants organiques.

Le développement des biotechnologies permet d'envisager l'utilisation, parallèlement à celle d'organismes et des enzymes sauvages, de systèmes aux performances améliorées ou modifiées : enzymes surexprimées (la concentration en enzyme d'intérêt dans le micro-organisme est nettement augmentée) et/ou purifiées obtenues par fermentation ou culture, modification génétique des micro-organismes... Les conséquences peuvent être de différents types : augmentation de la spécificité, augmentation de la vitesse des réactions, augmentation des rendements... Enfin, la biotechnologie industrielle permet l'utilisation de matières premières dérivées des ressources fossiles classiques, mais favorise surtout l'emploi de matières premières renouvelables. Elle accompagne, en particulier, le développement de la chimie des agroressources et du bois.

Les biotechnologies industrielles rassemblent, par nature, des technologies qui font appel à des compétences pluridisciplinaires. Cet aspect constitue le principal frein techni-

que à leur développement, renforcé par une communication encore insuffisante entre les mondes de la chimie et des biotechnologies. La disponibilité de matières premières d'origine renouvelable est également une barrière. Sur le plan économique, la mise en œuvre de nouveaux procédés peut nécessiter des investissements importants, ce qui favorise l'utilisation de procédés traditionnels sur des unités existantes. La présence d'un marché pour les produits des biotechnologies industrielles est également un facteur clé. Enfin, le contexte politique et sociétal est important : l'appropriation par le grand public et les décideurs des enjeux du développement durable est favorable. La position vis-à-vis des biotechnologies en général, et des organismes génétiquement modifiés en particulier peut être un frein. Les oppositions au développement des biotechnologies devraient cependant être moins vives dans l'industrie que dans le domaine de l'alimentation.

Les biotechnologies ont aujourd'hui déjà une place dans les secteurs pharmaceutiques et agroalimentaires. Leur pénétration dans d'autres domaines est pour l'instant limitée.

Enjeux, Impact

Ces technologies s'inscrivent dans le cadre plus large de la chimie durable. En permettant une production dans des conditions plus douces, notamment de température, et à partir de ressources renouvelables, les biotechnologies industrielles apparaissent comme une des réponses à plusieurs grands enjeux socio-économiques : énergie, changement climatique et évolution des ressources fossiles.

La R&D et l'innovation sont clairement identifiées comme des facteurs clés pour mainte-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Matériaux - chimie

nir la compétitivité de l'industrie chimique, au niveau français et européen. Les biotechnologies industrielles sont, dans ce cadre, un des principaux axes thématiques à privilégier. Ainsi :

- le groupe de réflexion stratégique français présidé par le député D. Garrigue préconise, dans sa proposition n°10 du rapport *Avenir de l'industrie chimique en France à l'horizon 2015* (mai 2005)¹, de « développer l'effort de recherche et d'innovation dans le domaine des biotechnologies industrielles pour la chimie ». Il s'agit d'un des trois secteurs à développer ;
- les représentants européens des industries chimiques (Cefic) et des bio-industries (Europabio) ont identifié les biotechnologies industrielles comme un des trois piliers techniques pour la construction de la plateforme technologique européenne SusChem (www.suschem.org).

Par ailleurs, les biotechnologies industrielles représentent des facteurs favorables par rapport à certaines menaces qui pèsent sur la compétitivité de la chimie française, notamment l'augmentation du coût des énergies et des matières premières fossiles.

Une croissance significative des applications des biotechnologies industrielles est prévisible à l'horizon 2010 au niveau mondial. En France, l'impact des biotechnologies industrielles se sera fait sentir à l'horizon 2015.

Marché

Le principal marché concerné par les biotechnologies industrielles est celui de l'industrie chimique au sens large, dont l'industrie pharmaceutique et la détergence. D'autres industries sont visées : industrie agroalimentaire notamment, mais aussi les secteurs de la pâte et du papier, du bois, du textile, du traitement des minerais et de l'environnement (biodépollution). Dans le domaine de l'énergie, les biotechnologies industrielles favorisent le développement des biocarburants. Par ailleurs, les biotechnologies industrielles ont également un impact, en amont, sur les marchés susceptibles de fournir les matières premières nécessaires : agriculture et industrie forestière.

Le marché mondial des produits obtenus grâce aux biotechnologies industrielles représenterait actuellement 50 Md\$, et pourrait atteindre 160 Md\$ en 2010. Les biotechnologies industrielles pourraient représenter à cette date 10 à 20 % de la production sur l'ensemble de l'industrie chimique, et de 30 à 60 % sur le segment de la chimie fine. Tous les segments de l'industrie chimique sont en fait concernés par les biotechnologies industrielles : en chimie de base, la préparation de biocarburants et d'éthanol par fermentation ; en chimie de spécialités, la synthèse de produits naturels (vitamines...), de polymères, de biopolymères ou de biopesticides ; en chimie fine, comme intermédiaires dans la fabrication de produits pharmaceutiques, mais également d'arômes, de parfums et en agrochimie.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, chimie physique, chimie analytique, chimie moléculaire, génie des procédés.

■ Compétences technologiques : biotechnologies, pharmacie - cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Industries et agroressources (Champagne-Ardenne, Picardie).

■ Liens avec (technologies) : carburants de synthèse issus de la biomasse, accélération de la dégradation des déchets fermentescibles et valorisation énergétique, transgénération, procédés catalytiques, microtechnologies pour l'intensification des procédés.

■ Principaux acteurs français :

Centres de compétences : CNRS (unités membres du Club biocatalyse en chimie organique notamment), ICSN (Gif-sur-Yvette), IFP, Insa Toulouse.

Industriels : Aventis, Biométhodes, Libragen, Proteus, Rhodia, Servier.

Deux initiatives régionales apparaissent particulièrement bien engagées dans le domaine des biotechnologies industrielles :

- en Champagne-Ardenne et Picardie, le pôle de compétitivité à vocation mondiale « Industries et agroressources » ;
- en Midi-Pyrénées, le réseau régional de recherche technologique « Agroressources et biotechnologies ».

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ; fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien ; industrie textile ; industrie du papier et du carton ; chimie, caoutchouc, plastiques ; production de combustibles et de carburants ; captage, traitement et distribution d'eau.

(1) Disponible à partir de www.industrie.gouv.fr/portail/secteurs/index_manufacture.html.

L'une des trois thématiques prioritaires du réseau de recherche et d'innovation technologique RIB (Réseau innovation biotechnologies) est le « *développement de tests environnementaux, de bioprocédés industriels, de technologies alternatives propres* ».

■ Exemples d'acteurs dans le monde : BASF (Allemagne), Cargill (États-Unis), Degussa (Allemagne), DSM (Pays-Bas), DuPont (États-Unis), Genencor (États-Unis), Lonza (Suisse), Mitsubishi Rayon (Japon), Novozymes (Danemark)...

Commentaires

Deux réflexions stratégiques et prospectives au niveau européen et français identifient les biotechnologies industrielles comme un axe

thématique fort pour l'avenir de l'industrie chimique. En France, le rapport *Avenir de l'industrie chimique en France à l'horizon 2015* (mai 2005) propose de « *développer l'effort de recherche et d'innovation dans le domaine des biotechnologies industrielles pour la chimie* ». Les mesures à prendre et les modalités de mise en œuvre de cette proposition sont également exposées dans le rapport et doivent guider les actions des pouvoirs publics sur le sujet. On souligne en particulier l'opportunité d'articuler les actions dans les biotechnologies industrielles avec le pôle de compétitivité à vocation mondiale « Industries et agroressources » en Champagne-Ardenne et Picardie.

Matériaux - chimie



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

22. Microtechnologies pour l'intensification des procédés

Description

L'intensification des procédés consiste, via le développement de techniques et d'appareils adaptés, à réduire de manière importante la taille des unités en rapport avec leurs volumes de production, leur consommation énergétique... L'intensification des procédés concerne l'ensemble de la chaîne de production : stockage, réaction, séparation, isolement et analyse des produits, séchage, mise en forme...

L'utilisation de microsystèmes est l'une des grandes voies technologiques qui permet d'atteindre cette intensification des procédés. Là encore, toutes les étapes du process sont concernées ; microréacteurs, mais également micromélangeurs microéchangeurs,... Dans ce domaine, l'évolution des microtechnologies ouvre des perspectives nouvelles. On sait désormais fabriquer, à l'échelle du micron, des composants parfaitement structurés dans différents matériaux compatibles avec une production chimique. L'intensification des procédés promet d'abord le développement de procédés plus sûrs, plus efficaces (énergie...) et moins coûteux. Parallèlement, le meilleur contrôle des conditions opératoires fait espérer une amélioration significative de la qualité des produits : carburants plus performants, médicaments plus efficaces (l'augmentation de la sélectivité des réactions chimiques est ici un enjeu clé), matériaux mieux adaptés à leur usage...

Malgré les évolutions récentes des techniques de microfabrication, des améliorations restent nécessaires, en particulier sur la nature des matériaux employés. Parallèlement, l'intensification des procédés se fera grâce au développement des techniques de modélisation et de conception assistée par

ordinateur des procédés. Enfin, la compréhension et la maîtrise des mécanismes physico-chimiques mis en jeu à cette échelle sont nécessaires.

Enjeux, Impact

Deux enjeux essentiels sont concernés par le développement de l'intensification des procédés :

- la compétitivité de l'industrie chimique : la démarche d'intensification des procédés a d'abord été engagée dans ce sens. Elle permet une meilleure occupation de l'espace, des coûts de production réduits (gain de temps...), mais surtout une diminution de l'intensité capitalistique des procédés. Cette logique a conduit aux premières expérimentations dès la fin des années 1970 ;
- le développement durable : l'intensification des procédés s'inscrit dans le cadre de la chimie durable. De ce point de vue, l'impact le plus immédiat concerne la sécurité des installations industrielles. Les microsystèmes chimiques sont, pour l'instant, essentiellement mis en œuvre pour conduire des réactions dangereuses. À plus long terme, les impacts de l'intensification de procédés répondront aux grands enjeux environnementaux : maîtrise des consommations énergétiques, préservation des ressources naturelles.

Marché

Le marché principal de ces technologies est celui de l'industrie chimique. Des industries connexes (amont et aval) sont également concernées, en priorité le raffinage, la pharmacie, les cosmétiques, les biotechnologies et l'environnement.

Le marché des microéquipements reste encore modeste, et serait compris entre 30

Matériaux - chimie

et 35 M€ en 2004. Il pourrait atteindre, selon certains analystes, 100 M€ d'ici à 2010.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie analytique, chimie moléculaire, chimie du solide, matériaux, optique, physique des milieux dilués, énergétique, mécanique des fluides, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : optique, analyse, mesure et contrôle, chimie organique, chimie macromoléculaire, chimie de base, traitements de surface, matériaux - métallurgie, biotechnologies, moteurs - pompes - turbines, procédés thermiques, composants mécaniques.

■ Pôles de compétitivité : Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes).

L'intensification des procédés est identifiée par le pôle de compétitivité à vocation mondiale « chimie-environnement Lyon Rhône-Alpes » (Axelera) comme un des enjeux de ses travaux sur l'axe technologique « procédés ».

■ Liens avec (technologies) : techniques de criblage et de synthèse à haut débit, Procédés catalytiques, biotechnologies industrielles, micro et nanocomposants.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA-Leti, Ineris, LAAS (Toulouse), LSGC (Nancy).

Industriels : Rhodia, STMicroelectronics, Tronic's...

Le laboratoire des sciences du génie chimique de Nancy (CNRS-INPL) coordonne le projet européen de recherche Impulse (www.impulse-project.net/) sur le thème de l'intensification des procédés.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Bayer (Allemagne), Boehringer Ingelheim (Allemagne), Corning (États-Unis), Degussa (Allemagne), Merck KgA (Allemagne), Siemens Axiva (Allemagne)...

La plate-forme technologique européenne SusChem (www.suschem.org/), établie par les représentants européens des industries chimiques (Cefic) et des bio-industries (Europabio) identifie l'intensification des procédés comme l'une des principales voies de son axe technologique « conception des réactions et des procédés ».

Commentaires

Aujourd'hui, l'industrie française semble en retrait dans ce domaine, alors que des équipes de recherche sont motrices, notamment dans la conduite de projets de R&D européens (Projet Impulse du 6^e PCRD), en partenariat avec des industriels étrangers (Degussa, Siemens Axiva, notamment). Des initiatives telles que le projet Impulse, ou le choix de l'intensification des procédés comme un des axes de travail du pôle Axelera, témoignent d'un potentiel scientifique, technique et industriel sur le sujet.

129

Degré de diffusion
de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ;
fabrication de savons, de
parfums et de produits
d'entretien ; chimie, caoutchouc,
plastiques ; production de
combustibles et de carburants.

Matériaux - chimie



23. Recyclage des matériaux spécifiques

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les technologies utilisées dans le domaine du recyclage varient en fonction des matériaux à traiter. Elles concernent, notamment, les étapes de désassemblage, de préparation (broyage), de tri des matériaux et, le cas échéant, de purification.

Les technologies à développer concernent notamment le secteur des plastiques dont le recyclage va devenir de plus en plus important pour répondre aux exigences réglementaires européennes et françaises. Dans ce contexte, le développement de techniques de tri automatique est particulièrement important. Les développements technologiques représentent une moindre importance pour d'autres matériaux :

- les métaux : les technologies de recyclage des métaux, notamment de tri, sont éprouvées, aussi bien pour l'acier que pour l'aluminium et les métaux précieux ;
- le verre : les technologies de recyclage du verre sont également matures. Des évolutions restent nécessaires pour améliorer les performances du tri par couleurs des produits en verre ;
- le papier : les évolutions technologiques concernent notamment le traitement des fibres recyclées. Des travaux sont nécessaires pour ce qui concerne l'association des matières premières et des matières recyclées. L'amélioration de la qualité de la matière recyclée, en utilisant notamment de façon optimale les nanomatériaux est également un axe de développement. Cette problématique des fibres recyclées est importante dans le cas de l'industrie française qui utilise largement le recyclage. La filière papetière française a développé une forte expertise en matière de recyclage et de recyclabilité.

Pour tous les matériaux, la prise en compte du recyclage et de la recyclabilité dès la conception des produits est également un aspect important. Une mauvaise aptitude au recyclage peut représenter, pour certains matériaux et dans certains secteurs, un frein au développement des applications industrielles et commerciales : c'est notamment le cas des composites dans l'automobile.

Les facteurs clés qui doivent accompagner le développement du recyclage sont en fait plus économiques que technologiques. D'une part, la viabilité économique du recyclage dépend fortement du coût des alternatives pour le traitement des déchets. D'autre part, la gestion et l'organisation des filières, en amont et en aval, conditionnent également le recyclage des matériaux spécifiques : existence de débouchés pour la matière première recyclée, équilibre avec la matière première vierge, cohérence des mesures concernant la collecte des déchets avec la réalité industrielle de l'utilisation de produits recyclés...

Enjeux, Impact

Le premier enjeu dans lequel s'inscrit le recyclage est celui de la réduction de la production des déchets, l'objectif étant notamment de diminuer les mises en décharge. Le recyclage contribue, par ailleurs, à limiter les consommations des matières premières naturelles. Pour certains matériaux, le recyclage permet de s'affranchir, en partie, des difficultés d'approvisionnement et contribue ainsi à une dépendance moins forte des matières premières non disponibles en France. C'est notamment le cas pour les métaux précieux, mais des tensions sont d'ores et déjà apparues sur de nouvelles matières (acier). Ces enjeux d'approvisionne-

Matériaux - chimie

ment s'apprécie le plus souvent à l'échelle mondiale. Dans le cas des matières premières du BTP, ces enjeux sont régionaux, et sont largement différents, par exemple, en Île-de-France (déficitaire) et en Bretagne (excédentaire).

Dans certains cas, le recyclage s'accompagne également d'une diminution des consommations énergétiques. C'est le cas pour la fabrication du verre à partir de calcin, ou pour la seconde fusion de l'aluminium qui consommerait 95 % d'énergie en moins que la première. Pour de nombreux autres matériaux les impacts environnementaux doivent être évalués en comparant les économies de matières premières aux surconsommations éventuelles d'énergie (collecte, transport,...).

Enfin, le recyclage de certains matériaux répond directement à des enjeux réglementaires. L'évolution du recyclage des plastiques est ainsi nécessaire pour atteindre les objectifs des directives européennes, notamment en matière de recyclage des :

- emballages : directive 2004/12/CE du 11 février 2004 ;
- VHU (véhicules hors d'usage) : directive 2000/53/CE du 18 septembre 2000 (transposée par le décret n° 2003-727 du 1^{er} août 2003) ;
- DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) : directive 2002/96/CE du 27 janvier 2003 (transposée par le décret français n°2005-829 du 20 juillet 2005).

Les enjeux environnementaux et réglementaires se traduisent par des enjeux économiques pour les « producteurs » des déchets. Ces dernières années ont vu la mise en place des cadres qui fixent les responsabilités économiques des différents acteurs des marchés concernés (automobile, équipements électriques et électroniques...).

Marché

L'existence des marchés est notamment encouragée par les dispositions réglementaires européennes, qui, au travers de différentes directives, fixent des taux minimaux de

recyclage : 85 % de recyclage et réutilisation au 1^{er} janvier 2015 pour les VHU ; pour les matériaux d'emballage, les minimums de recyclage pour 2008 sont fixés en fonction des matériaux (verre 60 % ; métaux 50 % ; papier carton 60 % ; plastique 22,5 % ; bois 15 %).

Compte tenu de ces exigences, certains marchés vont être en forte progression dans les prochaines années. Le gisement de plastiques issus de l'automobile pourrait ainsi atteindre 150 000 tonnes par an en France à partir de 2015, alors que le recyclage de ces plastiques n'est pas aujourd'hui organisé. Les entreprises et les ménages français généreraient près de 2 Mt/an de déchets d'équipements électroniques.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie moléculaire, matériaux, optique, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : optique, analyse, mesure et contrôle, chimie macromoléculaire, matériaux - métallurgie, environnement - pollution, machines-outils, composants mécaniques.

■ Pôles de compétitivité : Trimatec (Languedoc-Roussillon).

■ Liens avec (technologies) : automatisation du tri des déchets, matériaux composites pour la construction, à base de matériaux recyclés ou de biomasse, fonctionnalisation des matériaux.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : BRGM (Orléans), Ensam Chambéry, CTP (Grenoble).

Industriels : C2P, CFF Recycling, Galloo Plastiques, Irsid (Arcelor), Pellenc Environnement, Plastic Omnium Recycling, Raoul Lenoir, Suez Environnement, Tredi, Veolia Environnement.

Institutionnels et représentants de l'industrie : Ademe (www.ademe.fr), Éco-emballages (www.ecoemballages.fr), Federec (www.federec.org).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; industrie textile ; industrie du papier et du carton ; chimie, caoutchouc, plastiques ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques ; bâtiment ; travaux publics ; commerce et réparation automobile.

Matériaux - chimie



24. Fonctionnalisation des matériaux

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les évolutions dans les usages des matériaux se traduisent par une complexification des cahiers des charges fonctionnels. On demande désormais aux matériaux d'être plus spécifiques et mieux adaptés à l'application pour laquelle ils sont prévus, l'objectif à terme étant de concevoir et produire des matériaux sur mesure. La fonctionnalisation des matériaux répond à des attentes multiples, parfois complémentaires. Ainsi, on peut vouloir :

- des matériaux plus performants : parmi les matériaux concernés, certains conservent en conditions extrêmes leurs propriétés mécaniques (résistance au fluage, à la fatigue, éventuellement aux chocs thermiques...) ou de résistance à la corrosion (réfractaires) : procédés en milieux extrêmes, tenue au feu, etc. Ces matériaux sont généralement des métaux et des céramiques, massives ou composites. L'amélioration des performances touche également les propriétés mécaniques, dont l'aptitude à absorber les chocs, les vibrations ou le bruit, à dissiper la chaleur ou à maîtriser les conditions de frottement. Dans la construction il s'agit de développer des matériaux à plus haute résistance (bhp, bthp, buhp : bétons hautes, très hautes, ultrahautes performances). C'est également le cas dans les transports où on cherche aussi à concevoir des structures qui permettent d'absorber l'énergie due aux chocs. Les matériaux à structure interne, présentant une organisation de la matière dans le volume (mousses, alvéoles, nids d'abeille...) répondent à ces exigences ;
- des matériaux plus durables : la durabilité des matériaux est une des principales performances à améliorer pour répondre aux exigences de sécurité accrues. La résistance au

vieillessement ou à l'endommagement est critique dans les transports (infrastructures et véhicules), la construction mais également les équipements industriels. Dans ce dernier cas, une meilleure durabilité se traduit par une diminution des coûts d'exploitation et des coûts liés aux arrêts de production. Une évolution technologique plus poussée du point de vue de la durabilité est la conception de matériaux capables de signaler leur état d'endommagement, voire de « s'autoréparer » ;

- une multiplication des fonctionnalités : cette tendance est notamment observée pour des matériaux de structure auxquels on confère des propriétés d'usage supplémentaires. Des exemples de telles réalisations sont les verres ou les bétons autonettoyants ;
- l'aptitude à la « transformation » : on peut également donner des fonctionnalités supplémentaires aux matériaux pour faciliter leur mise en œuvre ou leur traitement. Dans l'automobile, l'apport de propriétés électriques aux plastiques permet d'envisager leur mise en peinture directement sur les lignes de production ;
- l'aptitude à la recyclabilité : la recyclabilité des matériaux tend à devenir un élément dans leur sélection. Il s'agit donc véritablement d'une fonction que l'on cherche à développer, particulièrement dans les domaines soumis à des contraintes réglementaires ou économiques en matière de fin de vie des produits.

Les voies de fonctionnalisation des matériaux sont multiples : elle peut être réalisée en surface (nouveaux procédés de traitement de surface), dans la masse ou par la réalisation d'assemblages (assemblage multimatériaux). Les évolutions sur les connais-

Matériaux - chimie

sances et la maîtrise des matériaux nanostructurés sont favorables au développement d'une fonctionnalisation accrue des matériaux. L'incorporation de nanotubes de carbone permet ainsi de produire des matériaux aux performances mécaniques améliorées, ou avec de nouvelles propriétés électriques. L'utilisation de « matériaux adaptatifs » (piézoélectriques, alliages à mémoire de forme, magnétostrictifs) accompagne également cette tendance.

La maîtrise de l'ensemble des sciences et techniques liées aux matériaux apparaît comme le facteur clé pour répondre aux attentes identifiées ci-dessus. Il s'agit de mieux comprendre et orienter les corrélations structure-propriété. 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 est également critique.

Une collaboration étroite entre chimistes, physiciens, mécaniciens et formulateurs garantit une adaptation optimale des propriétés 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 coconception.

Enjeux, Impact

Les enjeux traités ici sont multiples. En développant des matériaux plus performants, par exemple absorbant les chocs ou les vibrations, on répond aux besoins accrus de sécurité dans les transports, la construction ou l'industrie. La prise en compte de la recyclabilité dès la conception des matériaux répond aux exigences réglementaires mais également sociétales.

Mais l'enjeu essentiel d'une généralisation de la fonctionnalisation des matériaux pour une meilleure adaptation à leur usage est la contribution à la constitution d'une industrie fondée sur la connaissance. Ceci permet simultanément de maintenir la compétitivité des industries utilisatrices et d'améliorer l'attractivité en renforçant les compétences françaises dans les sciences et techniques liées aux matériaux.

L'introduction de nouvelles fonctionnalités permet d'augmenter la valeur d'usage des

matériaux et des produits, et donc leur prix de vente, alors qu'à fonctionnalités égales la compétition avec les pays où les coûts de production sont plus faibles est plus difficile. Enfin, le développement et la commercialisation de matériaux fonctionnalisés plus spécifiques, pour de très nombreux marchés et applications de niche, sont compatibles avec l'essor d'un tissu performant de PME, de start-up ou de spin-off issues de grands groupes ou encouragées par les succès de travaux de la recherche académique.

Marché

Tous les marchés sont concernés par le développement des matériaux. 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 (sports et loisirs).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie du solide, matériaux, physique théorique, optique, physique des constituants élémentaires, physique des milieux dilués, physique des milieux denses, mécanique, génie des matériaux, psychologie, sociologie.

■ Compétences technologiques : semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, chimie macromoléculaire, chimie de base, traitements de surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail matériaux, procédés thermiques, composants mécaniques, transports, spatial - armement, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Industries et agroressources (Champagne-Ardenne, Picardie), Plasturgie (Rhône-Alpes, Franche-Comté), Techtera (Rhône-Alpes), Up-TEX (Nord-Pas-de-Calais), Mipi (Lorraine), Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes),

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

133

Domaines d'application

Édition, imprimerie, reproduction ; industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements mécaniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; industrie textile ; travail du bois et fabrication d'articles en bois ; industrie du papier et du carton ; chimie, caoutchouc, plastiques ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de matériel électrique ; bâtiment ; activités récréatives, culturelles et sportives ; services personnels et domestiques ; santé, action sociale.

Matériaux - chimie

■ Liens avec (technologies) : technologies physiques amont améliorées de traitement de l'eau, systèmes d'enveloppe de bâtiment, textiles techniques et fonctionnels, architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules, sécurité passive des véhicules, turbomachines, acoustique des véhicules, interfaces humain-machine, matériaux nanostructurés et nanocomposites, biotechnologies industrielles, recyclage des matériaux spécifiques, assemblage multimatériaux, nouveaux procédés de traitement de surface, procédés de mise en forme de matériaux innovants, méthodes et outils de coconception.

■ Principaux acteurs français : l'offre française est importante tant du point de vue des industriels que des centres de ressources. Centres de compétences : une description détaillée de cette offre est disponible via le « répertoire des matériaux avancés » édité par le ministère chargé de l'Industrie, et accessible en ligne : www.industrie.gouv.fr/observat/innov/materiau/so_mate.htm
Industriels : Arcelor, Arkema, Imerys, Lafarge, Rhodia, Saint-Gobain...

Commentaires

Le développement de matériaux aux fonctionnalités multiples encourage la commercialisation de produits à plus forte valeur ajoutée dans de nombreuses industries. Cet axe technologique constitue donc un levier important pour le maintien et le renforcement de la compétitivité de ces industries. La Commission européenne identifie ainsi les progrès sur les connaissances des matériaux comme une des activités à développer dans le cadre des travaux du 7^e PCRD. La conception de « matériaux fondés sur la connaissance dotés de propriétés sur mesure » est notamment souhaitée.

Le développement de ces matériaux sur mesure 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.



25. Textiles techniques et fonctionnels

Description

Les textiles techniques et fonctionnels sont des produits hautes performances, aux propriétés spécifiques adaptées à certains usages. Ces textiles peuvent être tissés, tricotés ou non tissés et les domaines d'application sont très variés. Les propriétés elles aussi sont très diverses : haute résistance, anti-feu, antimicrobien, déperlance, anti-UV, etc. Deux axes de développement sont privilégiés :

- les textiles fonctionnels ou multifonctionnels (vêtement de pompier qui résiste au feu, à l'eau, qui indique la température et détecte la toxicité des fumées...) ;
- les textiles techniques pour de nombreux secteurs : transport, bâtiment (protection contre le froid, le chaud), géotextiles (améliorant le comportement mécanique et hydraulique des sols), agriculture (textiles d'ombrage, filets de protection contre la grêle), automobile (des fils à haute ténacité sont produits pour réaliser les airbags), médical (orthèses, ceintures lombaires, implants, valves cardiaques)...

Sur un plan général, on cherche, de plus en plus, à améliorer la persistance dans le temps des propriétés particulières présentées par ces textiles, c'est-à-dire la résistance à l'usage, la tenue aux lavages, le non-relargage de particules. Par ailleurs, ils nécessitent l'établissement de cahiers des charges et la création d'une métrologie spécifique qui apporte la preuve des fonctions « cachées » revendiquées.

Enjeux, Impact

Le secteur textile doit s'adapter à l'émergence de nouveaux concurrents issus des pays à faibles coûts salariaux. Le besoin d'innover et de s'orienter vers des articles nova-

teurs à forte VA est indispensable pour contrecarrer la délocalisation de la production des produits traditionnels (habillement). Déjà très marqué, ce phénomène a été renforcé depuis le 1^{er} janvier 2005, date à partir de laquelle l'importation de vêtements et de produits textiles de Chine n'est plus soumise qu'à la présentation d'un simple document de surveillance délivré automatiquement. Par ailleurs, le respect des exigences réglementaires est un autre enjeu pour les textiles techniques. Au sein de l'UE, toute une série de normes sur les vêtements de protection a été développée : EN 465, 466 et 467 (protection contre les agressions chimiques), EN 469 et 1486 (protection contre le feu), ENV 50354 (protection contre les risques thermiques et les arcs électriques)...

Marché

Les textiles techniques et fonctionnels trouvent des applications dans de nombreux secteurs industriels : textile, électronique, agriculture, santé, transport (11 % en masse d'une voiture sont constitués de fibres), bâtiment et génie civil, sport...

La France réalise 24 % de la production européenne de textiles techniques et se classe, à ce titre, au 4^e rang mondial derrière le Japon, les États-Unis et l'Allemagne. La Chine est le premier consommateur mondial de textiles techniques.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie moléculaire, matériaux, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, chimie organique, traitements de surface, transports, spatial - armement, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Techtera (Rhône-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Matériaux - chimie

Alpes), Up-Tex (Nord-Pas-de-Calais).

■ Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules, nouveaux procédés de traitement de surface, procédés de mise en forme de matériaux innovants, assemblage multimatériaux, matériaux nanostructurés et nanocomposites.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : IFTH, R2iTH, Insa, Ensait.

Industriels : Dickson Constant, Ferrari, Porcher, Hexcel, Chargeurs Entoilage, Thuasne, Chomarat...

Rhône-Alpes est la région leader national dans les textiles techniques avec 65 % de la production française (plus de 300 000 tonnes) et 70 % du chiffre d'affaires national.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Asahi (Japon), Daikin (Japon), Dupont (États-Unis), Nanotex (États-Unis)...

Commentaires

Les textiles techniques prennent une part croissante dans la production des textiles. Ils s'inscrivent dans des niches et connaissent le plein succès lorsque ces niches atteignent la dimension internationale (tissu de verre pour électronique chez Porcher).

Par ailleurs, on peut imaginer que le développement et la maîtrise des textiles techniques permettront, à terme, de créer une nouvelle offre dans le domaine traditionnel du textile habillement.

Pour en savoir plus : www.ifth.fr ; www.r2ith.org

Degré de diffusion de la technologie

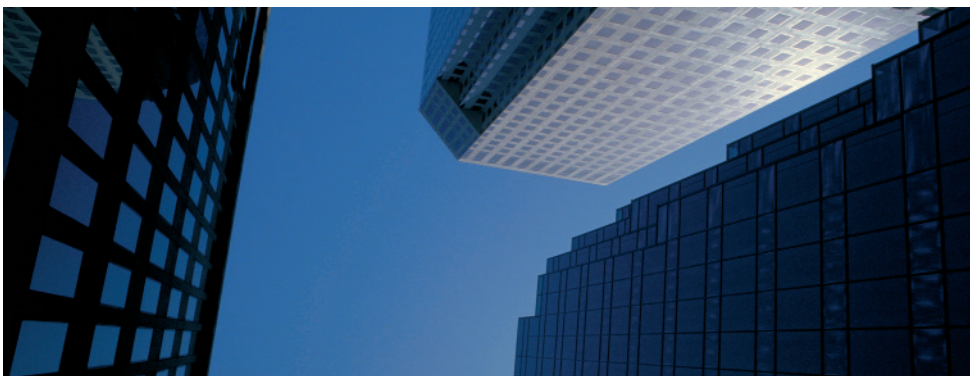
Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

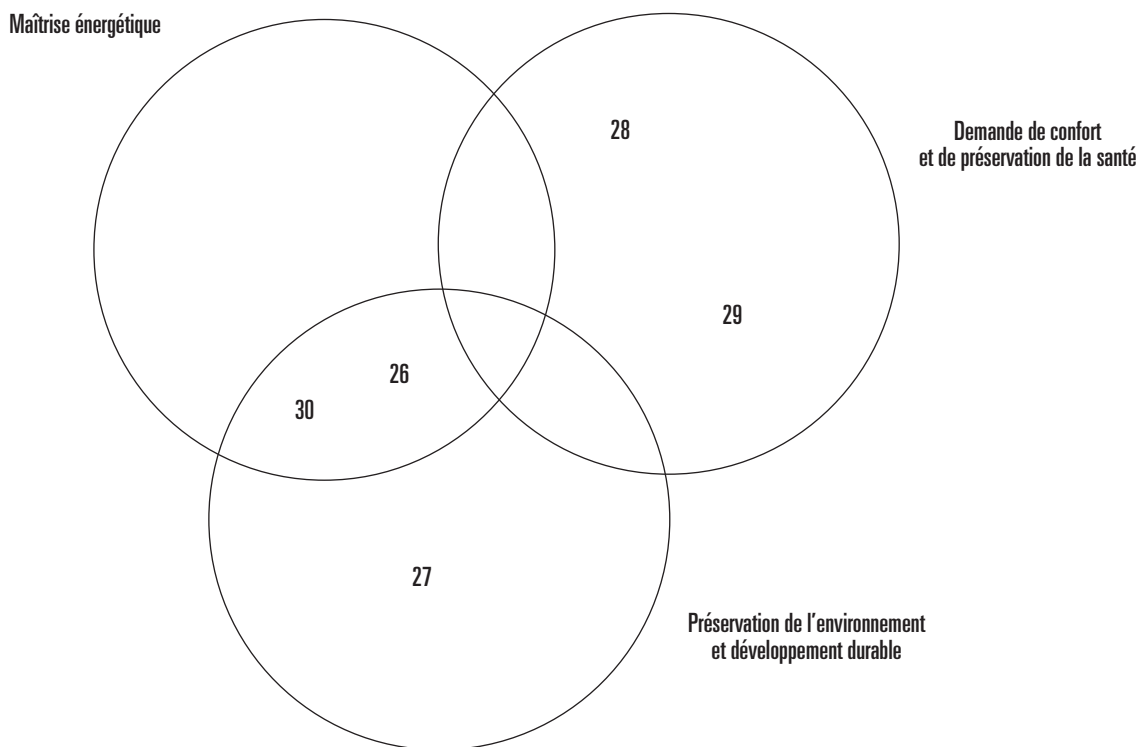
Habillement, cuir ; industrie pharmaceutique ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; industrie textile ; bâtiment ; agriculture ; recherche et développement.



Bâtiment

- 26 Systèmes d'enveloppe de bâtiment
- 27 Matériaux composites pour la construction, à base de matériaux recyclés ou de biomasse
- 28 Gestion de l'air dans le bâtiment
- 29 Gestion de l'eau dans le bâtiment
- 30 Technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment

Des grands enjeux aux technologies clés



Le secteur du bâtiment

Le contexte

Ce secteur a produit une valeur ajoutée de 571,2 Md€ en 2001 dans l'UE 25 et employé 11,9 millions de personnes. Le Royaume-Uni a contribué pour 76,4 Md€ à cette VA, suivi de l'Allemagne avec 67,6 Md€, puis de la France avec 52,1 Md€. La contribution de l'Espagne à la valeur ajoutée européenne dans ce secteur est presque aussi importante que celle de la France, ce qui montre la vitalité de ce secteur chez notre voisin.

En Europe, en 2002, la valeur ajoutée du secteur peut être décomposée ainsi : le tiers des activités de construction concerne les bâtiments non résidentiels, un quart l'entretien et la rénovation du bâti existant, un quart la construction d'habitat neuf et 18 % les services d'ingénierie civile. Les faibles taux d'intérêt ont soutenu la demande pour la construction ces dernières années. Cependant, l'évolution de la valeur ajoutée par actif dans ce secteur, orientée à la baisse depuis quelques années, suggère que la création de valeur pourrait s'être déplacée vers les fabricants de composants du bâtiment (structures préassemblées).

Les deux tiers de cette VA européenne

sont réalisés par des petites et moyennes entreprises. Un cinquième de la valeur ajoutée est produite par de grands groupes. Ce qui caractérise plus particulièrement ce secteur est la part importante d'emploi en compte propre (22,5 % de l'emploi du secteur).

Si la France est au troisième rang européen pour la valeur du secteur de la construction, elle est au quatrième rang pour l'emploi européen dans ce secteur (le Royaume-Uni, qui est au premier rang en terme de valeur ajoutée, est au cinquième rang de l'emploi européen de ce secteur, la première place pour l'emploi étant détenue par l'Allemagne). La France est le pays européen qui dispose du plus grand nombre d'entreprises

internationales dans le domaine de la construction.

Un marché commun européen de la construction se met en place progressivement. Il passe par l'harmonisation des normes (la directive sur les produits de construction en est la concrétisation) ainsi que par celle des règles d'attribution des marchés publics.

Les services immobiliers

Dans le domaine des services immobiliers, l'UE 15 représente 97 % de la valeur dans l'UE 25. En 2001, 175 Md€ de valeur ajoutée sont générés par l'Europe des 15 dans cette activité à laquelle contribuent principalement l'Allemagne (51 Md€), loin devant la Grande-Bretagne (32 Md€), la France (25 Md€) en 2001 et l'Espagne (18 Md€).

Les microentreprises (moins de dix personnes) dominent l'activité et génèrent plus de la moitié de la valeur ajoutée.

La contribution au PIB des activités immobilières en général est plus de six fois supérieure à celle des seuls services immobiliers car la valeur est davantage produite par les plus-values des possesseurs de biens. Ces activités sont la seconde contribution au PIB français derrière les services aux entreprises.

Les enjeux de ce secteur

Les enjeux transversaux

Le secteur de la construction se caractérise à la fois par la place qu'il occupe dans l'économie - on estime que ce secteur consomme 40 % de toutes les ressources disponibles -, et le rythme très lent de renouvellement du parc existant, lié à la durée de vie relativement élevée des bâtiments et des infrastructures. Le bâti est caractérisé par une très forte hétérogénéité du parc, dans lequel

coexistent des bâtiments anciens, voire multiséculaires et appartenant au patrimoine, et des constructions récentes, mettant en œuvre des techniques de pointe. Les problématiques sont ainsi notablement différentes selon qu'elles concernent le parc ancien, pour lequel les techniques relèvent de la réhabilitation et de la rénovation, et le parc neuf, pour lequel les nouvelles techniques peuvent être introduites dès le stade de la conception de la construction.

Une des grandes priorités du secteur est le caractère « durable » de la construction. Il s'agit ici d'en réduire les impacts négatifs, en prenant en considération l'ensemble du cycle de vie, depuis la mise en chantier jusqu'à la démolition. Cette approche se décline au niveau des matériaux mis en œuvre, du devenir des déchets issus du secteur du BTP, de la consommation d'énergie et d'eau d'un bâtiment, des impacts éventuels sur la santé et la sécurité des occupants...

La démarche HQE (haute qualité environnementale) en est l'illustration. Il s'agit d'une démarche volontaire, qui implique une prise en compte de l'environnement à toutes les étapes de l'élaboration et de la vie des bâtiments : programmation, conception, construction, gestion, utilisation, démolition... Elle comporte deux grands volets :

- maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur : choix des produits, réduction des nuisances des chantiers, gestion de l'énergie et de l'eau... ;
- créer un environnement intérieur satisfaisant, en termes de confort (hygrothermique, acoustique...) et de santé.

Les enjeux spécifiques

Au niveau de la construction

Les principaux enjeux du métier consis-

tent à coordonner de multiples métiers (terrassement, maçonnerie, charpente, peinture, électricité, plomberie...) et à proposer les concepts d'habitat les plus appropriés aux besoins spécifiques et à la géographie, que ce soit en termes d'architecture (impact visuel dans un milieu), de conception énergétique du bâtiment (fonction du climat et des ressources en énergie), du type de milieu (urbain ou rural), des besoins de rénovation... L'introduction de nouvelles techniques peut être freinée par les habitudes et les pratiques en vigueur dans le domaine de la construction, la multiplicité des acteurs et les difficultés d'acceptation par les corps intermédiaires, voire le problème des malfaçons.

C'est un secteur où réglementation et normalisation ont un rôle essentiel. Un cadre a été défini au niveau européen par la directive 89/106 sur les produits de la construction, qui a établi une série d'« exigences essentielles » sur la base desquelles les matériaux et produits de construction doivent être évalués avant d'être déclarés « conformes » : résistance mécanique et stabilité ; sécurité en cas d'incendie ; hygiène, sécurité et environnement ; sécurité d'utilisation ; protection contre le bruit ; économie d'énergie et isolation. Il s'agit là d'une grille d'analyse qui oriente la conception des produits destinés à ce secteur.

Si l'on se réfère aux objectifs du protocole de Kyoto sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, le secteur résidentiel-tertiaire joue un rôle clé. En France, les trois quarts de l'énergie finale des bâtiments, premier poste de consommation énergétique dans le bilan national, sont consommés pour le chauffage. Or, dans le résidentiel, les énergies fossiles (gaz naturel et fioul) sont majoritaires.

C'est pour répondre à cet enjeu que le Plan climat lancé en France en 2004

comporte un volet Bâtiment et écohabitat, qui prévoit de privilégier l'utilisation d'équipements performants, de renforcer l'isolation, de rénover les logements anciens... Il se traduira, en particulier, par l'évolution de la réglementation thermique qui oriente la conception des bâtiments. Celle-ci sera progressivement renforcée dans les prochaines années dans le sens d'une plus grande maîtrise des consommations d'énergie, y compris par le recours aux sources d'énergie renouvelables. Au niveau européen, la directive performances énergétiques, qui s'applique aux bâtiments neufs et anciens, va dans le même sens : elle introduit l'obligation, avant toute transaction, de procéder à un diagnostic de performance énergétique, qui permettra de classer les bâtiments en fonction de leur consommation.

Enfin, les services de réhabilitation sont un enjeu fort : dans ce domaine, la maîtrise des coûts et l'amélioration de la fiabilité sont des priorités. De plus, le renouvellement du parc ne se fait qu'au rythme de 2 % par an : dans ces conditions, traiter le parc existant est essentiel, mais on manque de solutions « légères », alors que certaines opérations, comme la rénovation des réseaux dans les bâtiments existants, sont complexes.

Au niveau des services immobiliers

Le principal enjeu économique pour ces activités est que chaque proposition de vente ou de location soit connue le plus rapidement possible d'un acheteur éventuel. Les technologies de l'information et de la communication pourront donc jouer un rôle important pour ces activités. Les obstacles sont avant tout d'ordre culturel, dans un secteur où la rétention d'information et l'attitude des bailleurs peuvent constituer des freins ;

se pose alors la question d'une éventuelle qualification des acteurs, tels que les gestionnaires de biens.

Les tendances d'évolution du secteur

Le secteur dans son ensemble est confronté à des exigences accrues de la part des occupants : plus de confort et de sécurité, plus de flexibilité, plus de « durabilité » au sens large, ainsi qu'une plus grande maîtrise des coûts (de construction, d'entretien, de rénovation). Une des conséquences est l'intervention de plus en plus fréquente des clients finaux en amont, dès le stade de la conception : la personnalisation devenant la règle.

La diversification des modes de vie des ménages peut conduire à une demande de logements plus modulables pour s'adapter aux différents moments de la vie. Le vieillissement de la population aura ainsi un impact sur les bâtiments, au niveau de leur conception en particulier : adaptation à la mobilité réduite, offres associant logement et services... Au-delà de cette dimension démographique, on constate une attente de plus en plus forte sur la qualité sanitaire du bâtiment (à travers le thème de la qualité de l'air intérieur, par exemple), alors que l'on ne sait pas encore correctement y répondre. La sécurité domestique est également une demande majeure, mais la question est complexe. On ne sait pas pour l'instant comment traiter ce besoin, ces risques étant trop divers.

En ce qui concerne la consommation énergétique, au-delà de la question de la maîtrise des coûts, la demande de toujours plus de confort va probablement accroître la demande de climatisation,

déjà généralisée dans l'automobile, en période estivale.

Il existe également de nouveaux modes de fonctionnement. On peut ainsi louer les services associés à un immeuble (gestion technique, maintenance...). C'est le cas par exemple des partenariats public-privé : les constructeurs associent un bâtiment et des services spécifiques. Néanmoins, il reste difficile de connaître le coût de maintenance d'un bâtiment au moment où on le construit, d'où la difficulté à correctement dimensionner un projet.

L'évolution technologique du secteur

Les principales tendances technologiques peuvent être déclinées selon trois axes principaux :

- les matériaux : on estime que la moitié des matériaux extraits de la planète sont transformés en matériaux et produits de construction ;
- la construction en tant que processus : méthodes, procédés de fabrication, organisation, outils de conception... ;
- les services et équipements associés : gestion des bâtiments, services de réhabilitation-rénovation...

En ce qui concerne les matériaux, une des tendances consiste à privilégier le choix de produits performants d'un point de vue environnemental, selon des critères et des méthodes d'évaluation qui restent à affiner. Les matériaux et produits élaborés à partir de produits recyclés ou issus de la biomasse sont une voie à explorer.

On vise également la mise au point de matériaux à plus haute valeur ajoutée, à propriétés améliorées et/ou possédant de nouvelles fonctionnalités, en rupture avec les catégories qui permettent de

classer habituellement les matériaux de construction (structure, couverture, revêtement, etc.). Les matériaux auto-nettoyants et les matériaux à transition de phase stockant et restituant la chaleur en sont des exemples.

Des innovations peuvent être introduites au niveau du processus de construction proprement dit. Ainsi, la multiplicité des usages des bâtiments, la diversité des localisations et des besoins des ménages, le caractère diffus des entreprises et la diversité des choix technologiques militent pour de nouveaux outils d'aide à la conception et de planification pour les entrepreneurs du bâtiment.

Cette tendance pourrait trouver son aboutissement, à terme, dans l'« industrialisation » de la construction. Il s'agit d'une approche en rupture avec le point de vue traditionnel selon lequel chaque bâtiment étant un objet unique, les outils et méthodes développés par l'industrie manufacturière (qui produit en série) ne peuvent pas s'appliquer au domaine de la construction. Cette approche recouvre en fait un ensemble de thèmes, parmi lesquels on peut recenser, de façon non exhaustive : l'utilisation d'éléments préfabriqués, les procédés de fabrication « hors-site » (en-dehors du chantier), les constructions « modulaires », l'automatisation de la fabrication et la robotisation, l'utilisation d'outils informatiques pour la conception et l'échange de données... L'objectif est non seulement de rendre le processus de construction plus efficace, mais également de mieux intégrer les demandes du client final.

La demande de confort et de santé concerne en premier lieu l'air, l'eau et la température. Elle a un impact direct sur les systèmes correspondants : ventilation, traitement de l'air, climatisation et chauffage, distribution de l'eau à l'intérieur des bâtiments, assainissement... Dans tous les cas, l'objectif est de maintenir un niveau élevé de qualité, grâce à des dispositifs de surveillance et de traitement spécifiques, qui doivent par ailleurs être économes en énergie et en eau. Cela se traduit concrètement par la mise en œuvre du recyclage (de l'eau, par exemple), de la récupération de chaleur, de systèmes de filtration... Les préoccupations sanitaires ont également un impact sur le choix des matériaux : on peut citer l'exemple des peintures et des revêtements de sols, susceptibles d'émettre des composés organiques volatils, ou celui des canalisations pour la distribution de l'eau potable. Dans certains cas, des critères sont clairement définis, par exemple à travers la réglementation (teneur maximale de plomb dans l'eau), et orientent les choix. Dans d'autres cas, une dimension subjective doit être intégrée (sentiment de confort) et rend plus complexe la conception des systèmes dédiés à la gestion technique du bâtiment.

Les enjeux énergétiques ont comme conséquence, entre autres, des progrès constants en matière d'isolation, qui permettent une réduction des consommations de chauffage rapportées au m². Des gains peuvent encore être espérés, grâce à des matériaux ou des vitrages plus performants. Plus généralement,

c'est toute l'enveloppe du bâtiment qui est appelée à évoluer. En revanche, le rendement énergétique des équipements les plus récents (chaudières, par exemple) se rapproche des limites que l'on peut espérer atteindre. Dans d'autres cas, par exemple au niveau des ponts thermiques et des liaisons, des solutions existent mais ne sont pas mises en œuvre en France actuellement. Une meilleure régulation permet également de réduire les consommations d'énergie.

Diminuer les besoins énergétiques n'est toutefois pas suffisant. On peut raisonner de façon plus globale et envisager le concept de « bâtiment à énergie positive ». Il s'agit de concevoir un bâtiment qui produit plus d'énergie qu'il n'en consomme. Pour cela, il faut que le bâtiment ait ses propres équipements de production, de préférence à partir de sources d'énergie renouvelables : panneaux photovoltaïques, capteurs solaires pour la production d'eau chaude, sondes géothermales, chauffage à partir de la biomasse... Plusieurs de ces technologies sont maintenant relativement bien maîtrisées ; néanmoins, leur intégration dans le bâtiment est loin d'être optimale.

Au-delà des aspects purement techniques et financiers, un des points clés sera l'acceptation de ce type de concept par les utilisateurs. Un des exemples est le toit équipé de panneaux photovoltaïques : le classement des sites peut constituer un obstacle, si un monument historique se trouve à proximité.

Bâtiment



26. Systèmes d'enveloppe de bâtiment

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La fonction « enveloppe » d'un bâtiment désigne l'interface avec l'extérieur. Relativement indépendante de la structure, l'enveloppe intègre des fonctions d'éclairage, de thermique, d'acoustique, de ventilation, de sécurité, d'esthétique... Elle met en œuvre des matériaux, des produits et des sous-systèmes, ainsi que leur intégration au bâtiment.

L'enveloppe joue un rôle clé dans la réduction des besoins énergétiques du bâtiment. L'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe peut être obtenue par l'isolation, le traitement des ponts thermiques, la maîtrise des transferts d'air et d'humidité, l'amélioration des vitrages, ... ce qui permet de mieux maîtriser la consommation d'énergie, que ce soit pour le chauffage ou la climatisation. La mise au point de « façades actives » et de « murs solaires », d'une isolation adaptée pour les opérations de réhabilitation, de « super-isolation », de vitrages sous vide ou à couches peu émissives, de toitures rafraîchissantes en sont des exemples.

Au-delà des aspects énergétiques, l'enveloppe peut également intégrer des fonctions nouvelles : les composants de façade ou de toiture deviennent ainsi de plus en plus multifonctionnels. On peut envisager de passer des façades traditionnelles purement « statiques » aux façades « dynamiques », dont les propriétés (transparence, perméabilité à l'air...) sont modulées automatiquement ou à la demande, en fonction des phases climatiques ou de la luminosité. Les façades peuvent également devenir démontables, évolutives, réutilisables et recyclables. Les façades autonettoyantes et les vitrages électrochromes illustrent ces différentes possibilités.

Enjeux, Impact

Concernant la réhabilitation de l'ancien, on estime que 50 % des logements construits avant 1975 ont fait l'objet d'une réhabilitation thermique. Des gisements d'économies, et donc une réduction des émissions de CO₂ liées au bâtiment, existent encore.

Concernant les bâtiments neufs, la nouvelle version de la réglementation thermique (dite RT 2005) prévoit une réduction supplémentaire des consommations d'énergie, ce qui imposera une isolation de plus en plus efficace.

La directive performances énergétiques, qui doit être transposée en droit français en janvier 2006, s'applique à tous les bâtiments, neufs et anciens. Le calcul de la performance énergétique tiendra compte des caractéristiques thermiques de l'enveloppe. Cette évaluation aboutira à l'établissement d'un certificat, communiqué à l'acheteur ou au locataire lors de la construction, de la vente ou de la location d'un bâtiment.

Marché

Le marché des logements neufs correspond à environ 300 000 à 400 000 logements par an (collectifs et individuels). Le parc existant est d'environ 25 millions de résidences principales et secondaires. Le secteur tertiaire représente environ 800 Mm² chauffés. Ces marchés sont stables.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : matériaux énergétiques, génie des matériaux, génie civil.
- Compétences technologiques : traitements de surface, matériaux - métallurgie, travail matériaux, BTP.
- Pôles de compétitivité : Ville et mobilité (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : systèmes photovoltaïques avec stockage intégré, technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment, matériaux nanostructurés et nanocomposites, fonctionnalisation des matériaux, assemblage multimatériaux, nouveaux procédés de traitement de surface, procédés de mise en forme de matériaux innovants.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cerma (CNRS Nantes), CSTB, CTBA, Fédération française du bâtiment (www.ffbatiment.fr).

Industriels :

- fabricants de produits pour la façade et la toiture : Arcelor, Lafarge Roofing, Imerys ...,
- fabricants de vitrages : Saint-Gobain,
- fabricants de produits d'isolation thermique et acoustique : Isover.

Commentaires

La consommation d'énergie du secteur résidentiel-tertiaire est aujourd'hui le principal contributeur à l'émission de gaz à effet de serre, pratiquement à égalité avec le secteur des transports. L'émergence de nouvelles solutions techniques pour réduire les consommations est une ardente obligation. La créativité appliquée au secteur du neuf est réelle, mais ne peut toucher, dans le meilleur des cas, que 2 % du parc chaque année. L'enjeu principal est donc la réhabilitation de l'ancien, y compris de logements ayant déjà fait l'objet d'une première réhabilitation (par exemple consécutive au premier choc pétrolier de 1973), compte tenu de l'évolution de la réglementation et des nouveaux défis.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; bâtiment ; travail du bois et fabrication d'articles en bois ; chimie, caoutchouc, plastiques.

Bâtiment



27. Matériaux composites pour la construction, à base de matériaux recyclés ou de biomasse

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Si les matériaux composites sont aujourd'hui d'utilisation courante dans des secteurs tels que l'aéronautique ou l'automobile, leurs applications dans le domaine du bâtiment et du génie civil restent embryonnaires. Ils se heurtent aux conditions de mise en œuvre, aux exigences de durée de vie des bâtiments ainsi qu'à de fortes contraintes en terme de coût (du fait de la concurrence des matériaux dits traditionnels). Deux familles de composites peuvent toutefois trouver des débouchés dans le secteur de la construction : les composites à matrice organique, et les composites cimentaires. Dans le gros œuvre, l'utilisation d'entrevous (éléments de plancher préfabriqués) en matériaux composites se développe rapidement.

Les fibres végétales de plantes annuelles (fibres de chanvre et de lin, par exemple) ou les fibres de bois peuvent être utilisées dans la formulation de certains polymères plastiques (polypropylène, PVC... constituant la matrice organique) comme renfort du matériau, en remplacement des fibres de verre. Plus légères, elles présentent également des propriétés mécaniques comparables à celles du verre (résistance à la traction, résilience...). Toutefois, leur sensibilité à la température et à l'humidité limitent encore leur utilisation.

Concernant l'utilisation de matériaux recyclés, il peut s'agir, en premier lieu, des déchets de construction et de démolition du bâtiment et du génie civil, mais aussi des déchets et sous-produits issus d'autres secteurs industriels. L'objectif est, ici, de proposer des matériaux nouveaux, et non simplement des matériaux de récupération (comme c'est le cas avec le réemploi de poutres, de tuiles...). On peut citer comme

exemples la terre cuite additionnée de sciure de bois, les panneaux reconstitués à partir de déchets de bois, les isolants à base de polyuréthane recyclé et de liège, les stratifiés avec âme en matériau recyclé.

La diffusion de ce type de matériaux composites est conditionnée par leur respect des spécifications propres au secteur de la construction, mais aussi par leur prise en compte, dès le stade de la conception, par les bureaux d'études, les architectes.

Enjeux, Impact

Le secteur de la construction se caractérise par de très gros volumes de matériaux mis en œuvre. Il s'agit également d'un secteur grand producteur de déchets : 30 Mt par an en France, dont environ 90 % sont mis en décharge.

Le choix de produits de construction à faible impact sur l'environnement fait partie de la démarche HQE (haute qualité environnementale) dans le domaine du bâtiment. Ainsi, 1 m³ de bois mis en œuvre fixe 1 tonne de CO₂ et fait économiser au moins 3 000 kWh utiles par m³ par rapport aux matériaux concurrents.

Marché

Le marché français des composites représente 300 000 tonnes par an (toutes applications confondues) ; le bâtiment en consomme 21 %.

Le marché des composites plastique-bois représentait 700 000 tonnes en 2002 (Europe et Amérique du Nord). C'est un marché largement dominé par les producteurs américains. Environ 70 % des produits vendus sont destinés au bâtiment.

Les composites sont aujourd'hui une classe de matériaux très marginale dans le secteur

de la construction. Ils correspondent à des marchés de « niches ». Cette situation devrait évoluer très rapidement, dans un sens favorable aux composites issus de la biomasse notamment.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie du solide, matériaux mécaniques, génie des matériaux, génie civil.

■ Compétences technologiques : chimie macromoléculaire, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail matériaux, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Plasturgie (Rhône-Alpes, Franche-Comté), Fibres naturelles Grand-Est (Alsace, Lorraine).

■ Liens avec (technologies) : recyclage des matériaux spécifiques ; assemblage multi-matériaux ; procédés de mise en forme de matériaux innovants.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEBTP, CSTB, CTBA, ENTPE, Pôle européen de plasturgie.

Industriels : Groupement de la plasturgie industrielle et des composites (GPIC) (www.gpic.fr), Silvadec...

Le tissu industriel de la transformation des composites est surtout constitué de PMI.

Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre du Réseau génie civil et urbain (RGCU) (www.rgcu.prd.fr).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Nexwood (Canada), Timbertech (États-Unis), Trex (États-Unis) ...

Commentaires

Le développement des utilisations de matériaux composites dans la construction est régulier. Il concerne notamment les composites à base de matériaux recyclés ou de biomasse, et plus généralement toutes les familles de composites. Il concerne autant les composants de gros œuvre que le second œuvre, notamment les façades (isolation en particulier). La créativité dans ce domaine est régulée par la réglementation et les garanties nécessaires apportées aux utilisateurs (décennale, etc). À moyen et long termes, les solutions constructives adossées à la biomasse (au sens large) devraient progressivement dominer, notamment en construction individuelle, la construction traditionnelle (à base de ciment) étant très énergivore et donc contributive aux émissions de gaz à effet de serre.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; travail du bois et fabrication d'articles en bois ; chimie, caoutchouc, plastiques ; bâtiment ; travaux publics.

Bâtiment



28. Gestion de l'air dans le bâtiment

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La gestion de l'air dans le bâtiment concerne les systèmes de ventilation et le traitement de l'air (filtration, humidification, rafraîchissement...). Deux objectifs sont recherchés dans l'amélioration de ces équipements :

- la réduction des consommations énergétiques, le renouvellement de l'air étant à l'origine de déperditions de chaleur ;
- la maîtrise de la qualité de l'air, élément clé du confort des occupants d'un bâtiment (température, hygrométrie, acoustique), ainsi que de leur santé (évacuation des polluants et des germes pathogènes).

Il s'agit, en particulier, de renouveler suffisamment l'air à l'intérieur du bâtiment de façon à maintenir sa qualité, tout en limitant les pertes thermiques.

On peut citer comme exemples les systèmes de ventilation avec récupération de chaleur, le couplage des équipements de ventilation avec la détection de polluants ou de fumées, le couplage avec la détection de présence, l'information aux occupants sur la qualité de l'air, l'utilisation de matériaux à émissions réduites, la filtration et la décontamination... La régulation doit permettre de ventiler où il faut, quand il faut, et de renouveler juste la quantité d'air nécessaire. La tendance est à la généralisation des systèmes asservis, pilotés automatiquement ou par les occupants.

Concernant les aspects sanitaires, la présence de polluants à l'intérieur des bâtiments (résidentiels et tertiaires) a d'ores et déjà été démontrée. Leurs sources, très diverses, peuvent elles-mêmes être intérieures (polluants émanant des matériaux et des équipements du bâtiment, voire des occupants eux-mêmes) ou extérieures. La gestion de l'air doit donc préserver les occu-

pants des émissions internes et des pollutions externes, grâce à des dispositifs de traitement adaptés ou par le contrôle des transferts extérieur-intérieur.

Enjeux, Impact

La directive performances énergétiques, qui doit être transposée en droit français en janvier 2006, s'applique à tous les bâtiments, neufs et anciens. Le calcul de la performance énergétique tiendra compte de la ventilation, de la climatisation, de l'étanchéité à l'air du bâtiment... Cette évaluation aboutira à l'établissement d'un certificat, communiqué à l'acheteur ou au locataire lors de la construction, de la vente ou de la location d'un bâtiment.

La question de la qualité de l'air intérieur est devenue une préoccupation majeure de santé publique, qui s'est concrétisée par la création, en 2001, de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur. Cet enjeu sanitaire concerne l'ensemble de la population, et plus particulièrement les personnes sensibles et fragiles.

Marché

Les équipements pour l'aéraulique et la réfrigération (toutes applications confondues) représentent un chiffre d'affaires en France de 4 Md€.

Les activités liées aux bâtiments sont historiquement marquées par des cultures locales fortes, ce qui limite l'exportation de solutions nationales. L'émergence de l'Europe du bâtiment (normes européennes) devrait favoriser les entreprises les plus dynamiques capables de profiter de cette évolution, en lien avec les organismes certificateurs.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biologie des populations et écologie, physique des milieux dilués, énergétique, mécanique des fluides, génie civil, automatique.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, environnement - pollution, moteurs - pompes - turbines, BTP.

■ Liens avec (technologies) : modélisation, simulation, calcul ; capteurs intelligents et traitement du signal ; systèmes d'enveloppe de bâtiment.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Atita (Association technique des industries thermiques et aérauliques), Cethil (Insa Lyon), Cetiatic, Costic, CSTB, ENTPE, Leptab (Université de La Rochelle).

Industriels : Aldes, Anjos, Astato, Atlantic, Ciat, France Air, Solyvent-Ventec, Vim... ; Syndicat national de l'exploitation climatique et de la maintenance ; Union climatique de France (www.ucf.fr) ; Uniclimate (www.uniclimate.org).

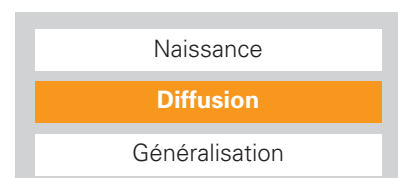
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Barcol Air (Suisse), Carrier (États-Unis), Daikin

(Japon), Itho (Pays-Bas), Matsuhita Electric (Japon), Systemair (Suède), Vent-Axia (Royaume-Uni)... ; AIVC - Air Infiltration and Ventilation Centre (www.aivc.org).

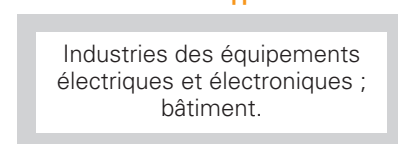
Commentaires

L'une des difficultés liées à l'application du principe de précaution est de distinguer les véritables enjeux de santé publique des psychoses collectives relayées par les médias. On peut suggérer qu'une place raisonnable existe pour une dépense supplémentaire relative au traitement de l'air dans les bâtiments. Elle est limitée par les contraintes fortes qui pèsent sur les coûts de construction, en l'absence d'une véritable démarche de prise en compte du « coût total de possession » par les usagers. Les solutions techniques proposées doivent tenir compte des attitudes et comportements des usagers : une coopération entre sciences pour l'ingénieur et sciences humaines et sociales est ici indispensable. La créativité des PMI et la production en grande série devraient favoriser l'apparition de nouvelles solutions.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Bâtiment



29. Gestion de l'eau dans le bâtiment

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Le réseau de distribution intérieure intégré au bâtiment, qu'il soit à usage tertiaire ou résidentiel, est en général alimenté en eau par le réseau public. Une bonne gestion de cette eau au sein du bâtiment doit en assurer la qualité, tout en préservant les ressources.

La conception et surveillance des réseaux dans les bâtiments doivent permettre de minimiser les risques sanitaires. Deux exemples illustrent cette problématique : le plomb, du fait que ce matériau a fréquemment été mis en œuvre dans les réseaux de distribution intérieure ; les légionnelles, bactéries susceptibles de se multiplier dans les réseaux de distribution lorsque les conditions sont favorables.

Ainsi, tout réseau comprend un système de canalisation qui doit être choisi en fonction des caractéristiques de l'eau à distribuer dans le bâtiment. Les matériaux employés peuvent avoir un impact direct sur sa qualité. Optimiser les consommations d'eau implique de rechercher des systèmes qui limitent la consommation d'eau potable : installation d'équipements performants, surveillance des réseaux pour diminuer les fuites, systèmes de récupération des eaux pluviales...

Ces différents objectifs peuvent également être atteints par la mise en place de systèmes individuels dans lesquels l'eau est traitée juste avant le point de consommation. Il s'agit ici pour l'utilisateur de « fabriquer » son eau en fonction de l'usage prévu : certains usages nécessitent une très bonne qualité de l'eau (boisson, par exemple), alors que pour d'autres usages (lavage des voitures, eau d'arrosage...), un tel niveau de qualité n'est pas justifié. Quelques systèmes simples sont déjà utilisés, tels que les adoucisseurs d'eau ou les filtres. Toutefois, les dis-

positifs actuellement disponibles sur le marché ne permettent d'éliminer ni les nitrates, ni la plupart des contaminations microbiologiques. Il s'agit plutôt d'équipements de confort, qui laissent en suspens l'aspect sanitaire.

En aval, le traitement des eaux usées peut être assuré par un réseau d'assainissement collectif ou par une installation d'assainissement individuel (typiquement moins de 50 équivalents-habitants). Ce dernier cas de figure concerne les zones sans réseau collectif, telles que les zones rurales. Alors que le cadre réglementaire pour ce type de dispositif se renforce, nombre de systèmes disponibles actuellement sont mal réalisés et très souvent mal entretenus.

Enjeux, Impact

On estime, en moyenne, que la consommation française en eau potable est de 150 litres par jour et par habitant. Si la quasi-totalité des logements français est aujourd'hui desservie par un réseau de distribution, l'utilisation de cette eau comme eau potable ne représente que 1 % des quantités distribuées. Cette proportion tend même à se réduire, au bénéfice de l'eau en bouteille. Par ailleurs, le vieillissement de la population induit une plus grande sensibilité à la qualité sanitaire de l'eau distribuée.

La directive européenne de 1998 sur les installations d'eau destinées à la consommation humaine, transposée en droit français en 2001, a introduit le contrôle de la conformité de l'eau utilisée pour la consommation humaine au robinet et non plus à l'entrée du bâtiment. Ainsi, la qualité de l'eau distribuée n'incombe plus seulement aux distributeurs d'eau mais aussi aux propriétaires et gestionnaires d'immeubles.

La gestion de l'eau fait partie de la démarche HQE (haute qualité environnementale) dans le domaine du bâtiment. Elle doit permettre, entre autres, la préservation des ressources en eau, en termes de prélèvement (recours à des eaux non potables, comme la récupération des eaux de pluie) et de limitation des rejets dans le milieu naturel (assurance de l'assainissement des eaux usées).

Environ 10 % de la population française, représentant 4 millions d'installations, est concernée par l'assainissement individuel. La loi sur l'eau de 1992 a introduit l'obligation, pour les communes, de mettre en place un service public d'assainissement non collectif, chargé du contrôle des installations. La mise en place d'une norme européenne et d'un marquage CE joue un rôle moteur dans l'amélioration du niveau de qualité de ces dispositifs.

Marché

Les volumes d'eau potable facturés aux abonnés domestiques et aux gros consommateurs s'élèvent à 4,2 milliards de m³, en 2001.

L'assainissement autonome représente en France environ 100 000 installations par an. Les entreprises de ce secteur produisent un chiffre d'affaires d'environ 380 M€, dont 30 % à l'export (source : IFAA).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biologie des organismes, biologie des populations et écologie, matériaux, mécanique des fluides, génie des procédés, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, chimie organique, chimie de base, matériaux - métallurgie, bio-

technologies, environnement - pollution, BTP.

■ Liens avec (technologies) : mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents ; technologies physiques amont améliorées de traitement de l'eau ; capteurs intelligents et traitement du signal.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Association scientifique européenne pour l'eau et la santé (ASEES, Université Paris 5), Association scientifique et technique de l'eau et de l'environnement (ASTEE) (www.astee.org), Costic, CSTB.

Industriels et syndicats professionnels concernés : fabricants de plomberie, de sanitaires, d'équipements de traitement de l'eau, de comptage... ; Syndicat national des industries de canalisations ; Industriels français de l'assainissement autonome (IFAA) ; Union des entreprises d'affinage de l'eau ; Association française des pompes et de la robinetterie.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : DVGW Technologiezentrum Wasser (Allemagne), KIWA (Pays-Bas), WRC (Royaume-Uni)... ; Water Supply and Sanitation Technology Platform (www.wsstp.org).

Commentaires

Compte tenu des évolutions réglementaires, la qualité de l'eau potable « au robinet » mobilise des partenaires plus nombreux tout au long de la chaîne de production-distribution. De nouveaux optimums émergent. De nouvelles solutions technologiques devraient favoriser l'apparition de nombreuses PME-PMI offrant de nouveaux matériels et de nouveaux services.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; captage, traitement et distribution d'eau ; bâtiment ; assainissement, voirie et gestion des déchets.

Bâtiment



30. Technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Si le bâtiment est essentiellement un lieu de consommation d'énergie, il peut également être un lieu de production décentralisé, utilisant en particulier les sources d'énergie renouvelable (ENR) : vent, soleil, géothermie, biomasse... À terme, l'objectif serait de rendre le bilan énergétique excédentaire : le bâtiment à énergie positive produirait ainsi plus d'énergie qu'il n'en consomme. Il couvrirait ses propres besoins et l'énergie non consommée serait livrée au réseau ou alimenterait d'autres bâtiments.

Il s'agit donc de mettre au point des outils, des méthodes ou des systèmes permettant d'intégrer des « composants ENR » pour la production d'électricité, pour le chauffage et la climatisation, ainsi que pour l'eau chaude sanitaire.

Les exigences à satisfaire sont multiples : multifonctionnalité, esthétique, facilité de mise en œuvre et de gestion, adaptation au comportement des utilisateurs, coût... Certains équipements sont aujourd'hui matures, comme dans le cas du solaire thermique, dont les capteurs peuvent désormais être intégrés dans la toiture. Les panneaux photovoltaïques se prêtent également bien à l'intégration au niveau de l'enveloppe du bâtiment, dont ils deviennent un composant à part entière. Des systèmes tels que les pompes à chaleur couplées à des sondes géothermales, peuvent être encore améliorés. On peut également envisager des systèmes hybrides ou combinés (solaire thermique et photovoltaïque, par exemple) et associer un stockage d'énergie (électricité, chaleur ou froid).

L'intégration passe aussi par une amélioration des systèmes de contrôle-commande ; la mise en œuvre de capteurs de mesure

adaptés aux systèmes solaires, afin d'en améliorer le fonctionnement, en est un exemple.

Cette approche concerne avant tout les bâtiments neufs pour lesquels l'intégration peut être prévue dès le stade de la conception. Toutefois, les bâtiments existants pourront bénéficier des méthodes et des techniques mises au point, en particulier lors des opérations de réhabilitation.

Enjeux, Impact

Le bâtiment consomme chaque année 70 Mtep (dont 49 Mtep pour le chauffage), soit 43 % de la consommation totale d'énergie finale en France. La maîtrise des consommations d'énergie des bâtiments est donc un enjeu majeur, que ce soit du point de vue des émissions de CO₂ ou de la part des sources d'énergie renouvelables dans le bilan énergétique français.

La nouvelle version de la réglementation thermique (dite RT 2005) prévoit l'introduction des énergies renouvelables dans les systèmes de référence (chaudières à bois, eau chaude solaire...) à prendre en compte dès la conception du bâtiment.

La directive performances énergétiques, qui doit être transposée en droit français en janvier 2006, s'applique à tous les bâtiments, neufs et anciens. Celle-ci préconise que le calcul de la performance énergétique tienne compte, de façon positive, de la présence, dans le bâtiment, de systèmes de chauffage et de production d'électricité faisant appel aux sources d'énergie renouvelables. Cette évaluation aboutira à l'établissement d'un certificat, communiqué à l'acheteur ou au locataire lors de la construction, de la vente ou de la location d'un bâtiment.

Marché

La principale ENR utilisée actuellement dans le secteur résidentiel est la biomasse : le bois de chauffage représente 7 à 8 Mtep par an (hors chaufferies collectives), essentiellement en habitat individuel (5,4 millions de maisons équipées).

La France comptait 726 500 m² de capteurs solaires thermiques en 2003 ; 52 000 m² supplémentaires ont été installés en 2004. Le marché européen représente environ 1 Mm² par an.

La Suisse est aujourd'hui le premier marché européen des pompes à chaleur couplées aux sondes géothermales ; ce marché est émergent en France, avec de nouveaux acteurs (bureaux d'études et ingénierie, calcul des installations).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, énergétique, mécanique des fluides, génie civil, automatique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, analyse, mesure et contrôle, matériaux - métallurgie, moteurs - pompes - turbines, BTP.

■ Pôles de compétitivité : EnREDIS (Rhône-Alpes), Énergies renouvelables-bâtiment (Languedoc-Roussillon), Énergies non génératrices de gaz à effet de serre (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

■ Liens avec (technologies) : systèmes photovoltaïques avec stockage intégré ; valorisation et distribution de la chaleur à basse température par pompe à chaleur ; contrôle-commande des réseaux et de la puissance ; systèmes d'enveloppe de bâtiment ; capteurs intelligents et traitement du signal.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, Cethil (Insa Lyon), CSTB, Institut national de l'énergie solaire (Chambéry), Institut technique européen du bois-énergie (ITEBE).

Industriels : Apex BP Solar, Clipsol, EDF, Giordano, Invicta, Supra, Tecsol... ; Afpac (Association française pour les pompes à chaleur) (www.afpac.org) ; Enerplan (www.enerplan.asso.fr) : Association professionnelle de l'énergie solaire ; Technosolar (Association des assembleurs et installateurs photovoltaïques et éoliens).

Exemples d'acteurs dans le monde : Buderus (Allemagne), Viessmann (Allemagne).

Commentaires

L'approche « systémique » du bâtiment, notamment de son fonctionnement énergétique, est aujourd'hui une réalité.

De manière générale, les nouvelles solutions techniques proposées, performantes et séduisantes, se heurtent à deux obstacles de taille (marché français) :

- technicité faible du monde de la construction ;
- absence d'entretien et de maintenance.

Une coopération entre le domaine des sciences pour l'ingénieur et celui des sciences humaines et sociales est indispensable pour mettre au point des solutions « acceptables » et éviter les contre-références comme, par exemple, des pompes à chaleur au début des années 80. Il n'est pas sûr que les acteurs industriels aient tous pris conscience de cet enjeu. La difficulté principale est ici encore l'extension à l'existant des nouvelles solutions proposées dans le neuf.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

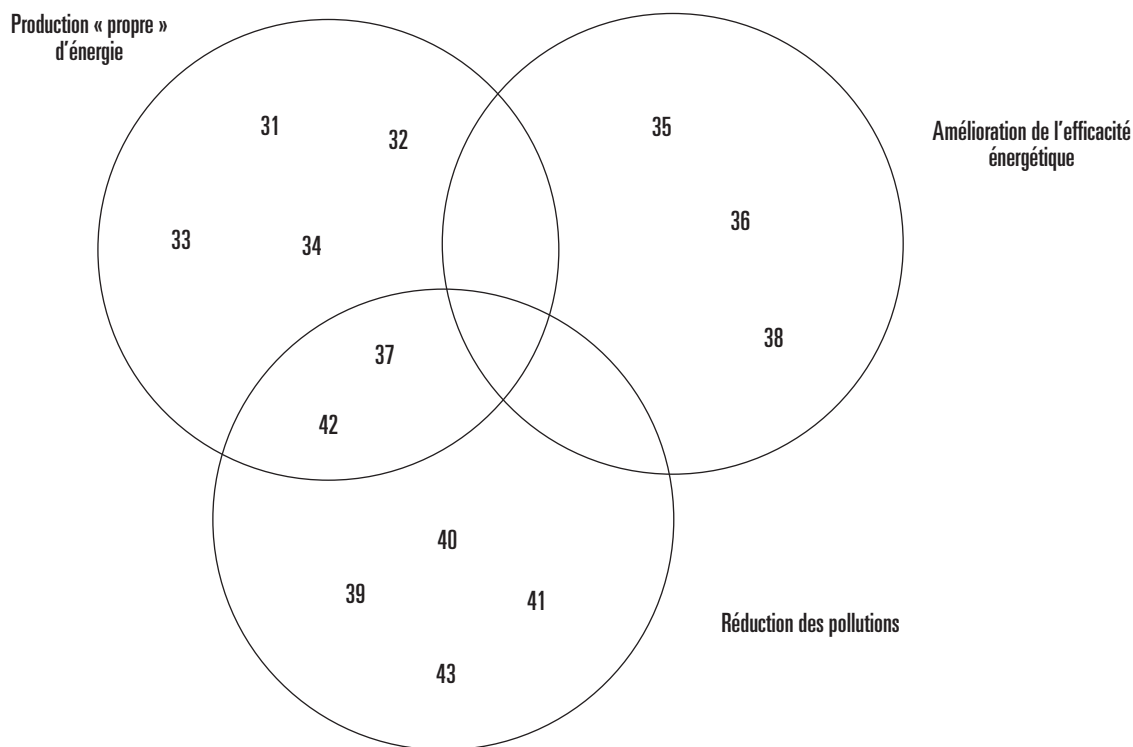
Industries des équipements du foyer ; industries des équipements électriques et électroniques ; production de combustibles et de carburants ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ; bâtiment.



Énergie - environnement

- 31 Systèmes photovoltaïques avec stockage intégré
- 32 Systèmes éoliens avec stockage intégré
- 33 Carburants de synthèse issus de la biomasse
- 34 Réacteurs nucléaires de 3^e génération
- 35 Valorisation et distribution de la chaleur à basse température par pompe à chaleur
- 36 Composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré
- 37 Capture et stockage géologique du CO₂ avec nouvelle conception de centrale à charbon
- 38 Contrôle-commande des réseaux et de la puissance
- 39 Mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents
- 40 Technologies physiques amont améliorées de traitement de l'eau
- 41 Automatisation du tri des déchets
- 42 Accélération de la dégradation des déchets fermentescibles et valorisation énergétique
- 43 Traitement des odeurs non confinées

Des grands enjeux aux technologies clés



Le secteur de l'énergie et de l'environnement

Le contexte

Production et distribution énergétique

La croissance de la demande énergétique est aujourd'hui tirée essentiellement par la demande électrique et les besoins de mobilité. Le premier besoin énergétique reste cependant, en France, la production de chaleur.

Au niveau européen, en 2001, le secteur

de l'énergie (comprenant l'industrie minière, la raffinerie, la production d'énergie nucléaire ainsi que la fourniture d'électricité et de gaz) a généré plus de 200 Md de valeur ajoutée et a employé 1,1 million de personnes dans l'UE15. La distribution d'énergie représente près des trois quarts de l'emploi et plus de 60 % de la valeur ajoutée du secteur. Presque deux tiers de la valeur ajoutée européenne sont dus au Royaume-Uni en raison de ses ressources pétrolières et gazières en mer du Nord ; mais en termes d'emploi, l'Allemagne représente presque la moitié de la main-d'œuvre européenne du secteur. La France se situe au troisième rang européen tant en termes de valeur ajoutée

qu'en nombre d'emplois.

La directive européenne 2001/77 a fixé comme objectif que 20 % de l'électricité soit produite à partir de sources renouvelables (biomasse, géothermie, solaire, hydroélectricité). La France produit environ 16 % de son électricité par ses installations hydroélectriques, le reste est majoritairement fourni par l'énergie nucléaire.

La France détient une position de tout premier rang mondial dans les énergies traditionnelles (électronucléaire, hydrocarbures) avec des acteurs industriels et des acteurs de la recherche publique leaders dans leur domaine et ayant une longue tradition de partenariat : Total, Areva, EDF, Gaz de France, Suez, Als-

tom, CEA, IFP...

Cependant sur les nouvelles technologies de l'énergie, la France tend à être en retrait par rapport à d'autres pays européens comme l'Allemagne sur le solaire photovoltaïque ou sur l'énergie éolienne. Dans ces domaines (solaire thermique ou photovoltaïque, éolien, géothermie...), les entreprises françaises sont plutôt des PME, même si un certain nombre d'entre elles sont des filiales de grands groupes (Total Énergie ou Apex BP Solar). Les dépenses de R&D dans les filières de l'énergie illustrent bien l'orientation de la France dans ces domaines.

Il est à noter que les constructeurs français d'éoliennes (ou de pièces pour éoliennes) ou de systèmes photovoltaïques bénéficient de l'essor de ces marchés dans d'autres pays.

Dans le domaine des productions de combustibles et carburants, la production française diminue depuis le milieu des années 90, mais la production de biocarburants (avec un objectif européen de 5,75 % des carburants utilisés en 2010) pourrait redonner un nouveau souffle à ce secteur.

C'est le secteur de la production et distribution électriques et de la distribution gazière, soit les services énergétiques (et de l'eau), qui a le plus progressé en termes de valeur ajoutée ces quinze dernières années en France avec une quasi-stabilité de l'emploi. La France est avec la Pologne le seul exportateur net d'électricité.

Fourniture et traitement de l'eau

Le marché de l'eau regroupe les activités liées à l'eau potable (captage, transport, traitement, affinage...), aux eaux usées (collecte, transport, traitement collectif ou individuel...) ainsi qu'aux eaux pluviales.

La distribution et le traitement de l'eau varient selon les pays européens et impliquent, selon les cas, des entreprises publiques ou privées ainsi que des collectivités locales. Une directive européenne d'octobre 2003 a été édictée pour promouvoir des tarifications qui reflètent les coûts réels ainsi que les économies d'eau. Le secteur a généré en 2001 une VA de 17,9 Md€ et employé plus de 300 000 personnes dans l'UE25. L'Allemagne représentait 27,2 % de la VA européenne et le Royaume-Uni 23,2 %. La collecte, la purification et la distribution d'eau ont produit une VA de 2 Md€ en France en 2001 ce qui la positionne au troisième rang européen de la valeur ajoutée du secteur.

En France, les trois quarts de la population sont desservis en eau potable par le secteur privé en délégation de service public. Le secteur privé de la distribution et de l'assainissement de l'eau est dominé par trois grandes compagnies de taille internationale qui se partagent le marché : Veolia Water (groupe Veolia), Ondeo (groupe Suez) et Saur. Le métier de ces entreprises multinationales est plus étendu que le seul domaine de l'eau ; ce sont en général des entreprises de «réseaux» qui gèrent aussi des activités dans le domaine de l'énergie,

des déchets ou des transports urbains. Veolia (premier opérateur en France) et Suez sont deux des leaders mondiaux du secteur.

Enfin, les sociétés françaises d'ingénierie du secteur de l'eau sont bien positionnées à l'export : c'est le cas, entre autres, de Sogreah, de Safege, de Burgeap... De leur côté, Suez et Veolia possèdent leur propre filiale spécialisée, respectivement Degremont et OTV. Toutefois, ces différentes sociétés restent d'une taille inférieure à celle de certaines de leur concurrentes, en particulier anglo-saxonnes.

Gestion des déchets et environnement

La gestion des déchets recouvre différents types de traitement de ces déchets : le recyclage des matériaux pour produire de nouveaux biens, l'incinération avec ou sans récupération énergétique, le compostage pour une récupération biologique, la simple réutilisation (cas des pièces automobiles par exemple) et la mise en décharge.

Diverses directives ont été adoptées en 2001 et 2004 par l'Union européenne pour réduire les déchets, les recycler et minimiser l'usage des ressources naturelles dans la fabrication des produits. Des objectifs de taux de recyclage ont été fixés, à horizon 2008, pour l'Europe à 15 (excepté la Grèce, l'Irlande et le Portugal qui disposent de trois années supplémentaires pour les atteindre) : le taux de recyclage à atteindre en poids est de 60 % pour le verre, le papier et le

Budget global consacré à l'énergie dans les organismes de recherche français (2002, en M€)

Budget global (dont État) 940 (600)	Nucléaire 580	Énergies fossiles 230	Nouvelles technologies de l'énergie 130		
			Renouvelables 50	Efficacité énergétique 40	Hydrogène et PAC 40

Source : Rapport Chambolle, juin 2004 pour le Minéfi et le ministère de la Recherche

carton, de 50 % pour le métal (avec une attention particulière pour les métaux des batteries), de 22,5 % pour le plastique (en comptant uniquement le recyclage dans les produits à base de plastique), de 15 % pour le bois. En 2001, le secteur du recyclage a généré 4,6 Md€ dans l'UE25 et y employait 106 000 personnes (soit environ 0,3 % de la valeur ajoutée de l'industrie dans l'UE25 et 0,3 % de l'emploi de l'UE15). Le recyclage des produits non métalliques représente un peu plus de la moitié de la valeur générée par le secteur. Le taux de croissance du secteur, tant en termes de production que d'emploi, a été particulièrement important ces dernières années (l'emploi a augmenté de 4,8 % par an dans ce secteur entre 1995 et 2000).

Le secteur est caractérisé par le foisonnement de micro et petites entreprises (moins de 50 employés) qui représentent plus de 62 % de la valeur ajoutée et plus de 68 % de l'emploi. Cette surreprésentation des petites entreprises est la plus importante de toutes les activités industrielles.

C'est la France qui génère la plus importante contribution à la valeur ajoutée de ce secteur en Europe (plus d'un quart avec 25,3 %), tandis que celle associée de l'Allemagne et du Royaume-Uni s'élevait à 38,5 % du secteur en 2001. Dans le domaine de l'air, le marché de l'instrumentation est dominé par le Français Environnement SA et l'Américain Thermo-Electron. Les entreprises françaises de ce secteur sont exportatrices, leurs compétences étant reconnues au niveau international. Le secteur du traitement des effluents gazeux est en développement, tiré par la demande industrielle.

Les enjeux du secteur

Les enjeux transversaux

Le principal enjeu commun à l'ensemble du secteur est la question de l'accès aux ressources et de leur exploitation sur le long terme, ainsi que des impacts qui en résultent. Cela concerne aussi bien les ressources énergétiques, les ressources en eau... que l'impact de leur utilisation sur l'environnement (émission de polluants, production de déchets...) et la population (enjeux sanitaires).

Les grandes orientations européennes sont marquées par une série d'engagements internationaux, parmi lesquels on peut citer le protocole de Kyoto, la Convention sur le transport de la pollution atmosphérique à longue distance, la convention des Nations unies sur la diversité biologique. Cela s'est traduit par la mise en place de programmes européens ou de directives, tels que le 6^e Programme communautaire d'action pour l'environnement, le Plan d'action en faveur des écotechnologies ou les directives-cadres dans le domaine de l'eau, qui sont ensuite transposés dans chacun des pays membres.

De ce point de vue, la réglementation joue un rôle moteur dans la prise en compte des impacts environnementaux. De multiples secteurs sont concernés car cette problématique est déclinée et intégrée dans les politiques menées dans le domaine des transports, des procédés industriels, de la production d'énergie, du bâtiment...

L'approche peut être plus délicate dans le cas des particuliers. Elle passe nécessairement par des actions d'information et de sensibilisation, qui font évoluer les pratiques et permettent aux consommateurs de faire leurs choix en toute connaissance de cause. L'information sur les performances énergétiques des

appareils ménagers ou des logements en sont des exemples. L'enjeu, à terme, consiste à modifier les comportements individuels en matière de déchets (mise en place de collectes sélectives, par exemple), de modes de transport, d'usages de l'eau...

Cette prise de conscience est plus marquée si un impact sanitaire est avéré, c'est-à-dire lorsque la santé humaine est affectée par telle ou telle pollution atmosphérique ou aquatique, par l'utilisation de substances dangereuses... L'intégration récente dans les études d'impact d'un volet évaluant les effets sur la santé de la population des projets soumis à réglementation (installations classées, par exemple) illustre cette tendance. Toutefois, malgré les progrès réalisés ces dernières années, de nombreuses inquiétudes demeurent : l'exposition dans le cadre de la vie quotidienne à des polluants tels que les poussières, l'ozone, les pesticides... en est un exemple.

Les enjeux spécifiques

Production et distribution énergétiques

L'énergie est appelée à devenir un des enjeux majeurs du XXI^e siècle :

- alors que les réserves en hydrocarbures vont s'épuiser au cours du siècle, la demande mondiale énergétique continue de croître à un rythme soutenu (de l'ordre de 60 % dans les 30 prochaines années), même dans les pays industrialisés, y compris la France ;
- par les émissions de CO₂ (dioxyde de carbone) qui en résultent, l'usage de combustibles fossiles est un des principaux facteurs explicatifs du changement climatique. Atteindre les objectifs du protocole de Kyoto relatif à la diminution des émissions de gaz à effet de serre passe nécessairement par des évolutions profondes dans ce secteur.

Néanmoins, à court terme, le pétrole, le gaz naturel et le charbon resteront prédominants. L'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables n'est toujours pas compétitive en termes de coût (sauf exception, comme le grand hydraulique), la fusion nucléaire n'est envisageable qu'à très long terme, et le recours à l'hydrogène, ressource non naturelle, ne résout pas la question de la production électrique de base.

Les politiques énergétiques des pays industrialisés ou en voie de développement doivent tenir compte de ces enjeux. Bien entendu, ces choix sont faits en fonction des ressources et de la demande énergétique propres à chaque pays. Dans le cas de la France, les grands objectifs de la politique énergétique ont été définis par la loi du 13 juillet 2005 :

- contribuer à l'indépendance énergétique nationale et garantir la sécurité d'approvisionnement ;
- assurer un prix compétitif de l'énergie ;
- préserver la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre ;
- garantir la cohésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie.

Pour atteindre ces objectifs, des investissements en recherche, développement et démonstration sont indispensables, investissements qui devront tenir compte du fait que le mix énergétique français du XXI^e siècle, au moins dans sa première moitié, combinera énergie nucléaire, combustibles fossiles et sources d'énergie renouvelables. On pourra noter au passage que la France, pays agricole, valorise encore insuffisamment ses ressources en biomasse, de façon directe (bois-énergie) ou à travers la production de carburants de synthèse issus de la biomasse.

Par ailleurs, le marché de l'énergie reste

marqué par le caractère volatil des prix. Cela concerne aussi, dans une moindre mesure, le transport de l'énergie, dont les coûts sont très variables. Des considérations politiques interviennent également, comme l'illustre par exemple la fixation des taxes sur les carburants. Ce trait marquant conditionne fortement le développement de telle ou telle filière technologique : ce qui est « économique » à un moment donné ne l'est plus nécessairement ultérieurement. Inversement, une filière jugée non rentable peut bénéficier d'un regain d'intérêt quelques années plus tard, même en l'absence de progrès technique significatif.

La France est un producteur majeur d'électricité en Europe : le nucléaire y est prédominant, et le savoir-faire associé peut être considéré comme un acquis. A priori, le kWh électrique français va rester abordable : les coûts liés au nucléaire vont rester inférieurs à ceux des combustibles fossiles. Ceci est favorable aux exportations françaises d'électricité, d'où l'importance des moyens de transport de l'électricité. L'Allemagne, où la production nucléaire doit être arrêtée, restera intéressée par un kWh moins cher.

En arrière plan de ces enjeux nationaux, on constate qu'un monde en forte demande de consommation d'énergie, notamment de la part des économies émergentes (Chine, Inde), est un monde qui suscite une élévation régulière des prix de référence de toutes les énergies, afin d'ajuster l'offre et la demande. Ainsi peut-on commenter le choc pétrolier de l'été 2005, qui augmente mécaniquement l'offre : réserves de pétrole précédemment non économiquement exploitables (mer profonde, par exemple), mais aussi énergies nouvelles et renouvelables (seuil de rentabilité relatif de l'énergie éolienne,

par exemple). Cette remarque vaut également pour le gisement des économies d'énergie. Plus que jamais, le découplage de la croissance du PIB et des consommations d'énergie (élasticité relative) passe par une exploitation intensive du gisement - inépuisable - des nouvelles technologies de maîtrise de l'énergie.

Fourniture et traitement de l'eau

La fourniture d'eau potable et l'assainissement ont aujourd'hui atteint en Europe un niveau de qualité acceptable. Le savoir-faire européen est indéniable : les trois plus grands groupes dans ce domaine, au niveau mondial, sont européens.

Le bilan de l'extraction et de la consommation d'eau au niveau européen apparaît globalement viable sur le long terme. Cela n'est pas forcément vrai au niveau local : certaines ressources s'appauvrissent, comme c'est le cas dans le pourtour méditerranéen ; d'autres se dégradent (pollution par les nitrates). Ainsi, il apparaît de plus en plus nécessaire, au moins dans ces régions, de réduire la consommation d'eau, de traiter ou recycler les eaux impropres à la consommation et de modifier certaines pratiques (cas de l'agriculture et de l'élevage).

Cette question de la pérennité de la ressource et de sa qualité prend une importance croissante, comme l'illustre la directive européenne sur l'eau (2000), qui définit un cadre pour la gestion et la protection des eaux par grand bassin hydrographique au plan européen. L'objectif est de parvenir à des niveaux de qualité de l'eau acceptables du point de vue de l'environnement et de la santé des personnes, tout en conservant un équilibre entre exploitation des ressources et usages qui soit viable sur le long terme.

C'est ainsi la maîtrise du cycle de l'eau dans son ensemble qui doit être améliorée, depuis la gestion des prélèvements dans le milieu naturel, jusqu'à la distribution chez le consommateur final et le traitement et le recyclage des eaux usées.

Gestion des déchets et environnement

Depuis de nombreuses années, la France fait face à l'augmentation continue du volume de déchets produits. Les actions pour y remédier sont de trois types, par ordre de priorité décroissante : la réduction à la source (prévention de la production de déchets, par l'écoconception des produits, par exemple), la valorisation (réutilisation, recyclage, valorisation énergétique) et, enfin, l'élimination (incinération sans valorisation énergétique, mise en décharge).

La loi du 13 juillet 1992 avait prévu qu'au 1^{er} juillet 2002 seuls les « déchets ultimes » seraient admis en décharge, un déchet ultime étant un déchet ne pouvant plus subir de traitement supplémentaire dans des conditions techniques et économiques acceptables. Cet objectif n'a pas été atteint. En amont, les pratiques de tri sélectif, déterminantes pour la qualité des flux de déchets et de leur traitement, sont notoirement insuffisantes et posent la question du comportement des usagers (tous déchets). En aval, les filières de valorisation, et plus particulièrement de recyclage, restent à développer, d'autant plus que plusieurs directives européennes ont fixé des objectifs ambitieux pour plusieurs familles de déchets : véhicules hors d'usage, déchets d'équipements électriques et électroniques, notamment. La croissance des besoins de recyclage des produits semble une tendance lourde pour les vingt prochaines

années. Il s'agit d'économiser les ressources et de limiter l'incinération et les mises en décharge, ces dernières présentant des risques de pollution des sols et occupant un espace peu valorisé par les populations voisines, qui, par ailleurs, en subissent les nuisances.

Toutefois, faire exister des filières de recyclage suppose d'assurer leur viabilité économique. Or, avec le renforcement du contexte réglementaire, le coût de traitement des déchets augmente régulièrement. D'autres aspects conditionnent également le développement du recyclage des déchets :

- l'insuffisance éventuelle des débouchés : cette limite concerne par exemple les déchets du bâtiment, dont le tonnage est trop élevé. Il y a alors pénurie d'exutoire ;
- l'homologation des matières premières secondaires : par défaut, leur utilisation peut faire l'objet d'autorisations spécifiques, mais ces matières recyclées conservent réglementairement leur statut de déchet ;
- les recyclages successifs : dans le cas des matériaux recyclés plusieurs fois, se pose la question de la dégradation progressive de leur propriétés ;
- l'insuffisance éventuelle du rendement énergétique du recyclage : c'est le cas par exemple des batteries, pour lesquelles on sait atteindre des rendements de recyclage matière élevés, mais l'énergie consommée est élevée. Un enjeu particulier pour la France est le traitement et le stockage des déchets nucléaires, qui reste l'un des principaux verrous à la croissance de cette technologie énergétique.

Dans le domaine de l'air, des progrès notables ont été réalisés dans la maîtrise des émissions produites par les centrales électriques, les installations de combustion, les sites industriels, les transports. Les efforts visant à améliorer

la qualité de l'air doivent toutefois être maintenus. La pollution atmosphérique reste problématique dans certaines zones en raison de la géographie et de la concentration des sources (exemple de l'ozone dans les grandes agglomérations). D'autres types de pollutions, comme la pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments, sont encore insuffisamment connus et a fortiori traités.

Les tendances d'évolution du secteur

D'un point de vue quantitatif, les besoins (en énergie, en eau...) vont continuer de croître durant les prochaines années, tendance qui résulte de la croissance démographique et de l'augmentation du niveau de vie.

Face à ces besoins, la question de l'acceptabilité sociale vis-à-vis des moyens pour les satisfaire reste posée dans de nombreux cas : on peut citer les inquiétudes liées aux impacts de la filière nucléaire, les réticences vis-à-vis des fermes éoliennes, le refus de nouvelles installations de traitement des déchets (usines d'incinération, centres de stockage...). Cette tendance est renforcée par l'acuité des questions sanitaires (épidémies de légionellose, présence de plomb et de nitrates dans l'eau potable...).

Dans ce contexte, un des points clés est le niveau des coûts considérés comme acceptables par le consommateur final pour répondre à ces enjeux : (sur)coût de l'énergie verte produite à partir de sources d'énergie renouvelables, (sur)coût du recyclage systématique des produits de grande consommation, (sur)coût des équipements plus performants en termes de consommation énergétique et d'émissions... Dans ces

différents domaines, les évolutions dépendront en grande partie de la perception des bénéfices résultant de ces (sur)coûts, bénéfices qui, le plus souvent, ne sont visibles qu'à moyen ou long terme.

Production et distribution énergétique

La maîtrise de la demande en énergie est une des priorités nationales. Cela concerne plus spécifiquement les secteurs résidentiel-tertiaire et transports, qui représentent pratiquement les trois quarts de la consommation énergétique française. Améliorer les techniques de combustion, diminuer la consommation énergétique unitaire (consommation en carburant des véhicules, par exemple) sont les objectifs à atteindre. Dans le résidentiel-tertiaire, l'amélioration des performances énergétiques (meilleure isolation, rendements plus élevés...) est contrebalancée par l'augmentation régulière de la taille des logements et des exigences de confort (chauffage, climatisation, ventilation...) : la demande énergétique continue donc de croître. Ces aspects sont abordés dans les chapitres consacrés à ces secteurs.

Au niveau mondial, la consommation d'énergie représente environ 10 Gtep, répartis schématiquement de la façon suivante : 1 Gtep pour l'électricité ; 2 Gtep pour les transports ; 3 Gtep pour la chaleur ; 4 Gtep perdus. Les systèmes et les rendements doivent donc être améliorés. Les voies envisageables sont, par exemple, la valorisation de la chaleur à basse température (par exemple, pompes à chaleur sol-air) ou la production combinée (cogénération, voire trigénération).

L'Union européenne joue un rôle moteur dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, les différentes mesures adop-

tées dans ce cadre ont un impact économique, qui pourrait constituer un handicap, en particulier pour les acteurs industriels, face à des pays qui seraient peu ou pas engagés dans de telles démarches, tels que les États-Unis ou la Chine : il y a là un risque de distorsion de concurrence. Le coût de l'énergie reste un critère déterminant du point de vue de la compétitivité : les orientations technologiques dans ce secteur doivent impérativement tenir compte de cet aspect.

Fourniture et traitement de l'eau

Globalement, la consommation d'eau, que ce soit sous forme d'eau potable, d'eau d'irrigation, d'eau de process pour l'industrie ou d'eau de refroidissement pour les centrales électriques, est en augmentation constante. Face à des ressources limitées, il y a donc une compétition accrue entre ces différents usages.

Il y a une tendance au recyclage de l'eau in situ, c'est-à-dire sur le site même où les effluents sont produits. Les sites industriels sont particulièrement concernés, l'objectif étant de réinjecter dans la chaîne de production au moins une partie des effluents. Dans le même ordre d'idée, il y a également un intérêt pour les solutions individuelles de traitement des eaux destinées au résidentiel, pilotables à distance, qui évitent d'allonger les réseaux : cela concerne en premier lieu les sites isolés, mais aussi les pays en développement.

Gestion des déchets et environnement

La valorisation matière est devenue une priorité pour nombre de producteurs de déchets, en particulier industriels. Au-delà de la question du coût des produits recyclés (et donc de leur compétitivité), leur utilisation est quelquefois freinée

par un déficit de connaissance de leurs propriétés, ou une non-conformité aux référentiels normatifs traditionnels. D'autres considérations, d'ordre culturel, sont également à prendre en compte : les pratiques de consommation, le marketing pratiqué autour des emballages... peuvent aller à l'encontre de la maîtrise de la production de déchets.

En ce qui concerne la qualité de l'air, la demande pour une purification des effluents atmosphériques de sites industriels à la source ne fera probablement qu'augmenter avec l'accroissement des normes environnementales, qui aura aussi comme conséquence une augmentation des coûts d'épuration. Enfin, la demande croissante de sécurité vis-à-vis de la santé pourrait accroître la demande de purification de l'air pour l'habitat.

Les tendances technologiques du secteur

D'un point de vue technologique, deux tendances apparaissent communes aux différents secteurs :

- une importance croissante de la métrologie environnementale (outils de mesure et d'analyse de tous les milieux, air, eau, sols, énergie), qui se traduit par un besoin croissant de capteurs ;
- le recours à des applications dérivées des biotechnologies : valorisation de la biomasse, traitement des déchets fermentescibles, biocapteurs, traitements biologiques des effluents, etc.

Production et distribution énergétiques

Ce secteur est marqué par plusieurs orientations : limiter l'impact environnemental de la production et de l'utilisation de l'énergie, augmenter l'efficacité

énergétique des systèmes et développer la production à partir de sources d'énergie renouvelables.

La production électrique avec des centrales thermiques classiques (utilisées pour la demande de pointe en France) ou des centrales nucléaires génère des polluants et du CO₂ pour les uns et des déchets dangereux pour les autres, déchets qui devront être réduits à défaut de pouvoir être éliminés. En terme d'émissions de CO₂, une augmentation de 10 % de la production d'électricité à partir d'hydrocarbures annulerait 30 ans d'économies réalisées sur les émissions des véhicules. La séquestration du CO₂ pourrait y remédier et ainsi contribuer à atteindre les objectifs de Kyoto. Cette option fait l'objet de plusieurs programmes de recherche européens, et pourrait intéresser directement des pays tels que la Chine où le charbon est encore prédominant. En ce qui concerne le nucléaire, les prochains réacteurs seront proches du parc existant d'un point de vue technologique (réacteurs à eau pressurisée), mais avec une disponibilité et une sûreté améliorées. La génération suivante, qui ne verra pas le jour avant 2030-2035, sera de conception très différente : réacteur à caloporteur sodium, à eau super-critique, à sels fondus...

Le degré de développement des énergies renouvelables en France varie grandement d'une filière à l'autre. Ainsi, dans le domaine du photovoltaïque, dont le coût reste très élevé, le silicium reste le matériau dominant, et les technologies associées vont continuer de progresser. L'intégration de panneaux photovoltaïques au bâtiment offre de nouvelles possibilités à cette filière, mais le principal obstacle à son développement est de nature économique et réglementaire. De nouveaux gisements éoliens sont à exploiter (essentielle-

ment en offshore), mais il subsiste de multiples difficultés techniques à intégrer une part croissante de ce type de production (intermittente) dans des réseaux conçus pour fonctionner avec de grandes centrales électriques fonctionnant en continu. La filière biomasse reste à développer : hors secteur domestique, les techniques de conversion (pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburant) sont insuffisamment maîtrisées. Enfin, si la géothermie basse et moyenne énergies (exploitée pour le chauffage) est aujourd'hui mature, la production d'électricité à partir de géothermie est encore embryonnaire en France, une des principales voies explorées - la technique des roches chaudes fracturées - étant encore au stade expérimental (site de Soultz-sous-Forêts).

Dans le domaine des réseaux électriques, il y a une tendance marquée vers la production décentralisée, en rupture avec le modèle traditionnel. À court terme, il s'agit plutôt de production à partir d'hydrocarbures, par cogénération voire microcogénération. Cette croissance de productions plus décentralisées, mais aussi plus aléatoires, va nécessiter une gestion beaucoup plus complexe du réseau électrique, qui avait été conçu pour distribuer l'énergie et non pour la recevoir, dans un contexte où la sécurisation des réseaux est devenue une priorité.

Dans ce cadre, des technologies comme les capteurs, les technologies de l'information, l'électronique de puissance seront nécessaires à l'évolution et la gestion des technologies de production et distribution énergétique, en complément des technologies de capture et/ou confinement des déchets ou émissions liés à ces productions.

Fourniture et traitement de l'eau

Les enjeux technologiques traditionnellement associés à ces activités concernent les réseaux ainsi que les technologies de purification et de recyclage : les équipements collectifs, comme les stations d'épuration mais aussi les technologies plus individuelles comme les fosses septiques.

En matière de traitement de l'eau, on est progressivement passé des traitements physico-chimiques aux traitements physiques (par membrane, par exemple), mais la compréhension des mécanismes reste à améliorer. Certains des problèmes rencontrés sont spécifiques à la France. Ainsi, la présence d'antibiotiques dans les eaux usées pose un problème particulier, du fait de la forte consommation de ce type de médicament.

Une attention particulière est accordée à l'évaluation de la qualité du milieu naturel. De ce point de vue, les technologies de surveillance ont un rôle à jouer. Plusieurs obstacles restent néanmoins à franchir. Ainsi, les mesures d'éléments tels que le plomb peuvent être faites rapidement. Ce n'est pas le cas des mesures microbiologiques, qui prennent une journée, voire plus.

Les préoccupations du secteur de l'eau s'étendent à l'aval, vers les technologies de distribution, aussi bien pour les besoins agricoles que pour la maîtrise de la consommation d'eau par les ménages (équipements performants à consommation d'eau réduite : sanitaires, machines à laver...).

Leur mise en œuvre est conditionnée par le contexte réglementaire et les questions sanitaires, mais aussi la dimension culturelle ainsi que les pratiques agricoles. Par exemple, tous les usages ne nécessitent pas d'eau potable : on peut alors envisager des réseaux « multiples » (doublement des

réseaux, par exemple). On pourrait aussi imaginer des technologies mises en œuvre aux points d'utilisation, permettant d'adapter la qualité au besoin, à partir d'un réseau unique. Toutefois, les techniques de traitement physiques sont encore onéreuses et posent des problèmes de maintenance.

Gestion des déchets et environnement

Les enjeux du recyclage sont tout autant dans les modes de collecte, notamment le tri amont, que dans les technologies permettant le tri des déchets et dans les technologies permettant de rénover ou transformer pour

une nouvelle utilisation, de récupérer de la matière ou encore de l'énergie à moindre coût.

Dans ce secteur, les enjeux peuvent dépasser les technologies, car compte tenu de la relative jeunesse de ce secteur et de son extension à d'autres produits manufacturés (exemple des modules photovoltaïques installés il y a vingt ans, dont certains arrivent maintenant en fin de vie), les processus de démontage et de tri doivent être sans cesse renouvelés. De même, de nouvelles filières d'utilisation de pièces ou de matériaux recyclés peuvent sans doute être imaginées.

Concernant les émissions polluantes

dans l'atmosphère, le renforcement de la réglementation (en particulier celle des installations classées) a favorisé le développement de techniques spécifiques pour le traitement des émissions de NOx (oxydes d'azotes), de COV (composés organiques volatils), de dioxines... Dans tous les cas, il s'agit de traiter des sources localisées, clairement identifiées et surveillées. Des progrès restent à réaliser au niveau des techniques de surveillance et de traitement adaptées à d'autres cas de figure : sources diffuses, sources réparties sur une grande surface, qualité de l'air dans le résidentiel-tertiaire...

Énergie - Environnement



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

31. Systèmes photovoltaïques avec stockage intégré

Description

Le photovoltaïque permet la production d'électricité fondée sur la conversion de la lumière du soleil, source d'énergie renouvelable, par des photopiles, actuellement à base de silicium. Un système photovoltaïque complet comprend, outre les photopiles associées en modules et panneaux, un convertisseur courant continu-courant alternatif, un régulateur et, éventuellement, un équipement de stockage de l'électricité.

La réduction des coûts de fabrication des systèmes photovoltaïques reste une priorité à court et moyen termes. Elle concerne en particulier la production de silicium de qualité « solaire », moins onéreux que celui de qualité « électronique ». À plus long terme, de nouveaux matériaux pourraient succéder au silicium cristallin : silicium amorphe, CIS (cuivre-indium-sélénium), CdTe (tellure de cadmium), matériaux organiques..., en particulier sous forme de couches minces. Par ailleurs, l'amélioration de la partie conversion-gestion peut permettre de réduire les pertes et d'améliorer la fiabilité des systèmes photovoltaïques.

Toutefois, le solaire photovoltaïque reste, par nature, une source intermittente. Sa mise en œuvre implique donc, en parallèle, un complément d'approvisionnement en électricité (réseau d'alimentation ou production locale, avec un groupe électrogène, par exemple) et/ou le stockage de l'électricité photovoltaïque produite durant les périodes ensoleillées - périodes qui ne coïncident pas nécessairement avec les périodes de consommation. L'objectif est ici de disposer de systèmes autonomes avec stockage de l'électricité intégré. Il s'agira le plus souvent de stockage électrochimique, sous forme de batteries d'accumulateurs. Ce type de dispositif

concerne au premier chef les régions septentrionales, dont la période d'ensoleillement est réduite et ne correspond pas nécessairement aux périodes de plus grande consommation d'électricité, ainsi que les zones où l'installation ne peut être reliée au réseau d'alimentation électrique : sites isolés, pays en développement...

Enjeux, Impact

La directive européenne 2001/77 relative à l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (SER) a fixé comme objectif pour la France une part de 21 % d'électricité SER en 2010, contre 15 % en 1997.

La loi de juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique française a retenu parmi ses priorités le développement des énergies renouvelables dans le secteur électrique. Du fait qu'il s'agit de ressources locales, elles contribuent à la sécurité d'approvisionnement énergétique. De plus, cet objectif est en phase avec ceux du protocole de Kyoto relatif à la diminution des émissions de gaz à effet de serre, transposé en France à travers le Plan climat. La production d'électricité au niveau national représentait en 2000 8 % des émissions de CO₂. Le développement de la production à partir de SER permettra de maîtriser l'évolution de ces émissions.

Marché

La production française d'électricité photovoltaïque s'élevait en 2004 à 27 GWh (7,4 GWh en 1998), dont 9 GWh à partir d'installations raccordées au réseau. À titre de comparaison, le total de la production d'électricité SER représente environ 72 TWh, dont 90 % d'origine hydraulique.

Énergie - Environnement

Le marché national reste modeste, si on le compare aux marchés allemand ou japonais, par exemple. En 2004, les nouvelles installations photovoltaïques connectées au réseau représentaient, en France, environ 5 MW, auxquels s'ajoute 1 MW en site isolé, pour un marché estimé globalement à 60 M€. Au niveau mondial, la production de modules photovoltaïques s'élevait à 700 MW en 2004, avec un rythme de croissance annuel en volume compris entre 20 et 35 %. Le Japon est prédominant : la moitié des cellules y sont produites.

Les perspectives à court terme concernent avant tout l'export. À moyen terme, l'intégration des systèmes photovoltaïques au bâti devrait offrir de nouveaux débouchés, en particulier au niveau national.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie du solide, matériaux, énergétique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, semi-conducteurs, matériaux-métallurgie.

■ Pôles de compétitivité : EnRRDIS (Rhône-Alpes), Énergies renouvelables-bâtiment (Languedoc-Roussillon), Énergies non génératrices de gaz à effet de serre (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

■ Liens avec (technologies) : contrôle-commande des réseaux et de la puissance ; sys-

tèmes d'enveloppe de bâtiment ; technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment.

Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA ; CSTB ; Institut national de l'énergie solaire (www.institut-solaire.com) (Chambéry).

Industriels : Apex BP Solar, Apollon Solar, Emix, Jipelec, Photowatt, Total Énergie... ; Enerplan (www.enerplan.asso.fr) : Association professionnelle de l'énergie solaire ; Technosolar (Association des assembleurs et installateurs photovoltaïques et éoliens).

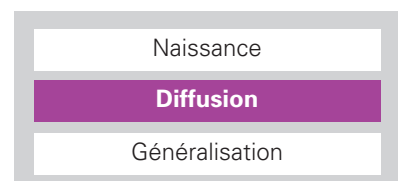
L'industrie photovoltaïque française repose essentiellement sur un ensemble de PME, en général adossées à des grands groupes, dont l'activité est en grande partie tournée vers l'exportation.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : BP Solar (Royaume-Uni), Kyocera (Japon), RWE Schott (Allemagne), Sharp (Japon), Shell Solar (Pays-Bas)... ; European Photovoltaic Industry Association (www.epia.org).

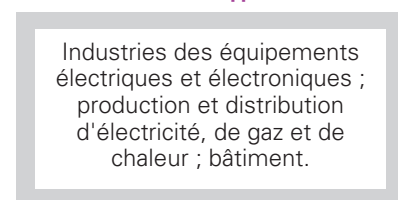
Commentaires

La distorsion évidente entre l'excellence des acteurs et l'atonie du marché intérieur français est un facteur de risque largement sous-estimé. Des mesures techniques, économiques et réglementaires peuvent permettre au marché intérieur du photovoltaïque (notamment raccordé au réseau) de décoller.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Énergie – Environnement



32. Systèmes éoliens avec stockage intégré

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les éoliennes utilisent l'énergie du vent à travers des pales pour la production d'électricité. En terme de puissance, la gamme est relativement large, depuis l'alimentation de sites isolés et non raccordés au réseau (machines de quelques watts à quelques kilowatts), jusqu'aux grandes éoliennes, dont la puissance unitaire peut atteindre quelques mégawatts, groupées sous forme de « fermes éoliennes » raccordées au réseau.

Si la conception des systèmes éoliens a aujourd'hui atteint une certaine maturité, cette filière conserve un potentiel d'amélioration. Parmi les voies à explorer, on peut citer :

- la caractérisation des sites éoliens (identification, évaluation du potentiel...) ;
- la prévision de la production d'un site à court terme (jusqu'à 48 h à l'avance) ;
- l'éolien offshore (modélisation, nouveaux types de turbines, tenue en environnement sévère...) ;
- la réduction de l'impact environnemental (bruit, impact sur l'écosystème...).

Un des principaux inconvénients de l'énergie éolienne est l'instabilité du vent, d'où une production d'électricité très fluctuante, à l'échelle locale mais également au niveau national. Néanmoins, selon RTE (Réseau de transport d'électricité), le système électrique français pourrait comprendre un parc éolien atteignant 10 GW sans nécessiter une augmentation significative des moyens mis en œuvre pour garantir sa sûreté (équipements thermiques permettant de faire face aux pics de la demande, par exemple). Cela résulte en particulier du fait qu'en France métropolitaine, les zones présentant le potentiel éolien le plus élevé ont des régimes des

vents pratiquement décorrélés : une répartition du parc éolien géographiquement équilibrée permet donc de compenser, en partie, les variations régionales.

Un renforcement et une gestion plus performante des réseaux, couplés à des systèmes de prévision à court terme de la production des sites éoliens, peuvent permettre d'augmenter le taux de pénétration de l'éolien. Toutefois, les équipements de production d'électricité en période de pointe et le stockage resteront incontournables.

Plusieurs types de stockage peuvent être mis en œuvre : stockage par pompage hydraulique, par batteries d'accumulateurs, stockage inertiel, supercondensateurs, voire conversion en hydrogène. Il s'agit soit de stockage de court terme, permettant un lissage de la puissance et un meilleur réglage des caractéristiques du courant livré au réseau (tension, fréquence...) en réponse aux variations rapides de la force du vent, soit de stockage de long terme, permettant en plus une meilleure planification en fonction de la demande en électricité. Le coût relativement élevé du stockage reste néanmoins un frein majeur au développement de ce type de couplage.

Enjeux, Impact

La directive européenne 2001/77 relative à l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (SER) a fixé comme objectif pour la France une part de 21 % d'électricité SER en 2010, contre 15 % en 1997.

La loi de juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique française a retenu, parmi ses priorités, le développement des énergies renouvelables dans le secteur électrique. Du fait qu'il s'agit de ressources loca-

les, elles contribuent à la sécurité d'approvisionnement énergétique. De plus, cet objectif est en phase avec ceux du protocole de Kyoto relatif à la diminution des émissions de gaz à effet de serre, transposé en France à travers le Plan climat. La production d'électricité au niveau national représentait, en 2000, 8 % des émissions de CO₂ ; le développement de la production à partir de SER permettra de maîtriser l'évolution de ces émissions.

Marché

En France, 91 MW ont été installés en 2003 (contre 2 645 MW en Allemagne au cours de la même année) ; en 2004, 75 aérogénérateurs supplémentaires, représentant 147 MW, ont été installés. Par ailleurs, début 2005, 566 demandes de permis de construire, représentant 3 198 MW, étaient en cours d'instruction. En 2004, la production française d'électricité à partir d'éoliennes s'élevait à 605 GWh. Pratiquement toutes les installations sont raccordées au réseau.

L'Europe, à elle seule, représentait, en 2002, 72 % de la puissance éolienne installée dans le monde. Les principaux pays concernés sont l'Allemagne, le Danemark et l'Espagne. Le secteur éolien européen détient 90 % du marché mondial de l'équipement, un marché devenu très concurrentiel. Neuf des dix plus gros fabricants mondiaux de turbines éoliennes sont basés en Europe.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), énergétique, mécanique des fluides, mécanique, génie des matériaux, génie civil, électronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, matériaux - métallurgie, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques.

■ Pôles de compétitivité : Énergies renouvelables-bâtiment (Languedoc-Roussillon), Énergies non génératrices de gaz à effet de serre (Provence- Alpes-Côte d'Azur).

■ Liens avec (technologies) : contrôle-commande des réseaux et de la puissance.

■ Principaux acteurs français

Industriels : Alstom, ATV (pales), Éole Industries (mâts), Jeumont, Petitjean (mâts), Rollix (couronnes d'orientation), Sime Industrie (freins), Vergnet... ; France énergie éolienne (www.fee.asso.fr).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Enercon (Allemagne), Gamesa (Espagne), GE Wind Energy (États-Unis), Nordex (Allemagne), Vestas (Danemark)... ; European Wind Energy Association (www.ewea.org).

Commentaires

En France, un des freins au développement de la production d'électricité à partir d'éoliennes n'est pas d'ordre technique, mais relève plutôt de l'acceptabilité sociale : la présence d'une ferme éolienne est parfois considérée comme une nuisance (esthétique et sonore). Améliorer les conditions techniques d'intégration de ce type de production dans les réseaux électriques est, en revanche, un enjeu européen.

La croissance du marché intérieur de l'éolien dépend des choix politiques et techniques faits par la collectivité. De plus, le contexte technique, économique et réglementaire doit être stable, sous peine de voir les acteurs impliqués privilégier le court terme. L'électrotechnique est un pôle d'excellence national. La France dispose ainsi des atouts lui permettant de faire de l'énergie éolienne un secteur d'activité créateur d'une forte valeur ajoutée, fortement exportateur, consolidé par quelques acteurs de dimension mondiale.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements électriques et électroniques ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ; travaux publics.

Énergie – Environnement



33. Carburants de synthèse issus de la biomasse

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les biocarburants sont produits à partir de matières premières végétales. Actuellement, les principaux biocarburants produits en France sont :

- l'éthanol et l'ETBE (éthyl tertio butyl éther), destinés aux moteurs à essence. L'éthanol est issu de plantes sucrières (betteraves, cannes à sucre) ou de céréales, et peut être transformé en ETBE par réaction avec l'isobutylène ;
- les esters méthyliques d'huiles végétales (EMHV) destinés aux moteurs diesel. Les EMHV sont produits à partir d'huiles extraites du colza ou du tournesol, puis transformées par une opération de transestérification avec du méthanol. Une variante consiste à utiliser de l'éthanol, éventuellement d'origine agricole, à la place du méthanol, de façon à produire un ester éthylique (EEHV). La réglementation précise la teneur maximale de biocarburant que l'on peut incorporer sans précaution particulière (pas de modification du moteur, maintien des propriétés du mélange) : 5 % en volume pour l'éthanol, 15 % pour l'ETBE, 5 % pour l'EMHV. L'utilisation de mélanges riches, comme l'E85 à 85 % d'éthanol, n'est possible que si le véhicule est spécifiquement adapté (*flexible fuel vehicles*, par exemple).

En France, les biocarburants sont principalement utilisés sous forme d'ETBE et d'EMHV. La viabilité de la filière reste très dépendante des questions de coût, ceux-ci n'étant pas encore compétitifs par rapport aux carburants issus du pétrole.

D'un point de vue technique, les développements visent à améliorer les rendements de conversion de la biomasse, actuellement médiocres, à mieux gérer les coproduits issus de la filière (glycérine, tourteaux...),

ainsi qu'à valoriser la biomasse lignocellulosique, que celle-ci soit issue de l'exploitation forestière (bois) ou de la filière agricole (paille). Deux voies sont utilisées pour valoriser ces ressources :

- la gazéification puis la liquéfaction, par exemple selon le procédé Fischer-Tropsch, qui permet d'obtenir des carburants directement substituables (gazole), procédé déjà mis en œuvre à l'échelle pilote ;
- la production d'éthanol grâce à des procédés biochimiques optimisés : hydrolyse par des enzymes cellulolytiques, fermentation éthanolique par des souches de levures.

Enjeux, Impact

La directive européenne 2003/30 sur la promotion des biocarburants a fixé comme objectif d'atteindre un taux de 5,75 % PCI (pouvoir calorifique inférieur) dans les carburants utilisés dans le domaine des transports. Par ailleurs, les biocarburants présentent un bilan CO₂ positif, en phase avec les objectifs du protocole de Kyoto. De plus, s'agissant d'une ressource locale, ils contribuent à renforcer la sécurité des approvisionnements et à maintenir l'activité en zone rurale.

La France bénéficie d'une bonne disponibilité des ressources en biomasse, mais le développement des biocarburants nécessitera des arbitrages entre cultures alimentaires et cultures non alimentaires. Cette filière pourrait constituer une réponse à la concurrence des pays à bas coût pour les produits agricoles, et permettrait également, le cas échéant, d'anticiper la réforme de la Politique agricole commune.

Marché

En 2004, 406 kt de biocarburants ont été

Énergie - Environnement

commercialisées en France. Cela représente l'équivalent énergétique de 0,83 % de l'ensemble des carburants. Au total, 25 000 hectares sont mobilisés pour la production d'éthanol. L'objectif proposé par le gouvernement français est d'atteindre 1 280 kt en 2007. À plus long terme, en recourant aux techniques actuelles, 10 Mtep pourraient être produits en utilisant 4 millions d'hectares de surfaces agricoles ; à titre de comparaison, en France, 10 millions d'hectares sont actuellement consacrés aux céréales.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie des organismes, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), énergétique, génie des procédés.

■ Compétences technologiques : chimie organique, biotechnologies, produits agricoles et alimentaires, procédés techniques, procédés thermiques.

■ Pôles de compétitivité : Industries et agroressources (Champagne-Ardenne, Picardie), Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie).

■ Liens avec (technologies) : moteurs à pistons, turbomachines, biotechnologies industrielles.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Agrice (Agriculture pour la chimie et l'énergie), CEA, Cemagref, IFP, Inra, LSGC (CNRS-Ensic Nancy).

Industriels : Diester Industrie, Novaol, Tereos, Total... ; constructeurs automobiles ; Association pour le développement des carburants agricoles (Adeca).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Abengoa (Espagne), Cargill (États-Unis), Nestlé Oil (Finlande), Petrobras (Brésil)... ; European Biodiesel Board (www.ebb-eu.org) ; Réseau d'excellence européen Bioenergy (www.bioenergy-noe.org).

Commentaires

La filière biocarburants a été créée à la fin des années 70 à la suite des crises pétrolières. En raison du contre-choc pétrolier des années 80 et de la persistance de coûts de production trop élevés, le développement de cette filière s'est ralenti. Dans la pratique, l'Europe se trouve actuellement en situation de surcapacité pour l'EMVH. Cette situation pourrait néanmoins être transitoire, étant donné l'augmentation régulière du prix des produits pétroliers.

Un des freins au développement des biocarburants (de type ETBE ou EMHV) en France tient à la nécessité de créer un nouveau « modèle économique » relatif à la formation des coûts et des prix de vente, le modèle « pétrolier » étant inadapté. Par ailleurs, les procédés de conversion de la biomasse lignocellulosique ne sont pas encore suffisamment matures pour être commercialisables.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; industrie automobile ; production de combustibles et de carburants.

Énergie - Environnement



34. Réacteurs nucléaires de 3^e génération

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Mise en place après le premier choc pétrolier, la filière électronucléaire occupe maintenant une place majeure dans le paysage énergétique français. Néanmoins, après le contre-choc pétrolier des années 80 et les accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl, le rythme de construction des centrales nucléaires dans le monde s'est fortement ralenti.

L'énergie nucléaire est bien adaptée à la production de base, avec un impact limité en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Au-delà de la question de la compétitivité du kWh électrique d'origine nucléaire, les deux enjeux majeurs de la filière sont la gestion des déchets et l'amélioration de la sûreté.

D'un point de vue technique, les réacteurs actuellement mis au point appartiennent à la « 3^e génération » : ce sont par exemple, ceux proposés par Framatome (EPR - *European Pressurized Water Reactor*), ou par BNFL-Westinghouse (AP 1000). Les réacteurs de troisième génération sont des concepts évolutionnaires, c'est-à-dire dérivés des réacteurs actuellement en fonctionnement. Conçus sur les mêmes principes, ils capitalisent dans leurs technologies l'expérience acquise par ces réacteurs pendant plusieurs dizaines d'années.

L'EPR est issu d'une coopération franco-allemande. Il présente un rendement légèrement supérieur à celui de la génération précédente (REP - Réacteurs à eau pressurisée). Son taux de disponibilité devrait atteindre 91 %, avec une durée de vie de 60 ans (contre 40 ans actuellement). La sûreté a été renforcée avec l'augmentation du nombre de systèmes redondants, l'amélioration de l'enceinte de confinement, ainsi qu'une meilleure stabilité en cas de séisme ou de choc externe.

D'ici à 2015, des tests sur des démonstrateurs, avant mise en œuvre en série, devraient être réalisés. En fait, les études sur les réacteurs de 3^e génération ont déjà atteint un stade avancé. La 4^e génération, quant à elle, pourrait être fondée sur une conception notablement différente, mais ne devrait pas voir le jour avant 2030-2035.

Enjeux, Impact

La loi de juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique française a retenu parmi ses priorités le maintien de l'option nucléaire à l'horizon 2020, un des objectifs étant le remplacement de l'actuelle génération de réacteurs. Par ailleurs, cet objectif est en phase avec ceux du protocole de Kyoto relatif à la diminution des émissions de gaz à effet de serre. L'énergie nucléaire pourrait jouer un rôle clé dans la lutte contre le réchauffement climatique au niveau national. L'industrie nucléaire française occupe une position de leader au niveau mondial. Figurant parmi les premiers postes du commerce extérieur, le secteur emploie directement en France environ 100 000 personnes, sans compter la sous-traitance.

Marché

L'énergie nucléaire permet de produire 78 % de l'électricité française. La puissance installée dans le monde est d'environ 360 GW. Fin 2002, 35 nouveaux réacteurs étaient en cours de construction.

Ces dernières années, l'annonce de l'arrêt du nucléaire dans plusieurs pays européens (Allemagne, Suède...) a contribué à la remise en cause de la pérennité de cette filière. Néanmoins, à court terme, le marché asiatique (et plus particulièrement la Chine et l'Inde) reste porteur. À plus long terme, l'évo-

Énergie - Environnement

lution de la filière nucléaire dépendra des décisions prises lorsque les premières générations de réacteur arriveront en fin de vie.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie du solide, matériaux, physique des constituants élémentaires, physique des milieux denses, énergétique, mécanique des fluides, mécanique, génie des matériaux, génie civil, automatique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, techniques nucléaires, matériaux - métallurgie, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques.

■ Pôles de compétitivité : Nucléaire de Bourgogne (Bourgogne), Trimatec (Languedoc-Roussillon).

■ Liens avec (technologies) : modélisation, simulation, calcul ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA

Industriels : Areva (premier groupe mondial dans le domaine du nucléaire), EDF... ; GIIN (www.giin.fr) : Groupe intersyndical de l'industrie nucléaire (200 entreprises interve-

nant sur le marché nucléaire ou électronucléaire).

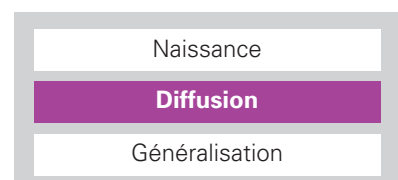
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Bechtel (États-Unis), Belgonucléaire (Belgique), BNFL (Royaume-Uni), General Electric (États-Unis), Mitsubishi (Japon), Urenco (Royaume-Uni)... ; Agence internationale de l'énergie atomique (www.iaea.org) ; World Nuclear Association (www.world-nuclear.org).

Commentaires

Aujourd'hui, l'option nucléaire est incontournable au sein du « mix énergétique » susceptible de répondre au défi des gaz à effet de serre. L'excellence de la filière française est reconnue à l'international, y compris aux États-Unis. L'implantation à Cadarache du futur démonstrateur de fusion vient renforcer cette excellence et cette image.

Alors que le programme électronucléaire français, décidé en 1974, a démontré son efficacité économique et environnementale, il appartient, aujourd'hui, à la France de mieux saisir les enjeux liés à l'acceptabilité sociale des filières nucléaires, notamment pour ce qui concerne les déchets.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application

Industries des équipements mécaniques ; industries des équipements électriques et électroniques ; production de combustibles et de carburants ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ; bâtiment.

Énergie – Environnement



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

35. Valorisation et distribution de la chaleur à basse température par pompe à chaleur

Description

Les pompes à chaleur permettent de prélever des calories dans une source « froide », puis de les restituer à une source « chaude » à plus haute température, qui bénéficie donc d'un apport de chaleur. La source froide peut être l'air extérieur ou une masse d'eau (nappe phréatique, lac, cours d'eau...) ; la chaleur est ensuite transférée à un fluide caloporteur : eau (circuit d'eau chaude) ou air (conduite d'air). Selon la combinaison adoptée, on parlera par exemple de pompe à chaleur air-eau ou de pompe eau-eau. La source peut également être le sol. On parle alors de pompe à chaleur géothermique, qui est une des applications les plus répandues.

Plus généralement, toute source de chaleur à basse température, donc non directement utilisable pour le chauffage ou la fourniture d'eau chaude sanitaire, peut être valorisée grâce aux pompes à chaleur. La source peut être naturelle, mais il peut également s'agir de chaleur « fatale », produite par exemple par un process industriel et habituellement perdue.

La plupart des pompes à chaleur sont d'une conception comparable à celle des machines frigorifiques. Le système comprend principalement des échangeurs, un compresseur et un circuit pour le fluide caloporteur. Ce type de pompe permet de produire en moyenne 2 à 4 kWh de chaleur en consommant 1 kWh d'électricité. Les pompes à chaleur à absorption, basées sur un cycle thermodynamique différent, sont d'une utilisation plus marginale.

Actuellement, les pompes à chaleur sont essentiellement utilisées dans le secteur résidentiel, pour le chauffage et éventuellement la climatisation (pompes à chaleur

réversibles). Dans l'industrie, hors chauffage des locaux, les applications sont plus limitées, dans la mesure où la chaleur produite atteint au plus 100-120°C, ce qui est le plus souvent insuffisant pour les process industriels.

Les pompes à chaleur sont une technologie relativement « mûre », mais qui continue de bénéficier de multiples développements : augmentation du coefficient de performance, amélioration de la régulation, combinaisons à plusieurs compresseurs, remplacement des fluides... Ainsi, le recours à des fluides tels que le CO₂ implique une modification en profondeur de la conception de la pompe à chaleur.

Enjeux, Impact

Le bâtiment consomme chaque année 70 Mtep (dont 49 Mtep pour le chauffage), soit 43 % de la consommation totale d'énergie finale en France. La maîtrise des consommations d'énergie des bâtiments est donc un enjeu majeur. Les pompes à chaleur géothermiques permettent de réduire la dépendance aux combustibles fossiles (gaz naturel et fioul, largement utilisés pour le chauffage) et donc de réduire les émissions de CO₂.

Marché

Avec environ 24 000 unités vendues en 2004 (10 000 systèmes air-air, 9 000 pompes à chaleur géothermiques et 5 000 systèmes air-eau), la France constitue le deuxième marché en Europe pour les pompes à chaleur. Les systèmes réversibles chaud-froid y sont en forte progression. Néanmoins, en terme de parc installé, elle a encore un certain retard par rapport à des pays tels que l'Allemagne, la Suède ou la Suisse.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), énergétique, mécanique des fluides.

■ Compétences technologiques : moteurs - pompes - turbines, procédés thermiques, composants mécaniques.

■ Pôles de compétitivité : EnRRDIS (Rhône-Alpes), Énergies renouvelables-bâtiment (Languedoc-Roussillon).

■ Liens avec (technologies) : technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cetiat, Costic, Greth (Groupement sur la recherche sur les échangeurs thermiques).

Industriels : EDF, Enalsa, Entropie, Erset, France Géothermie, Solterm... ; Afpac (www.afpac.org) (Association française pour les pompes à chaleur).

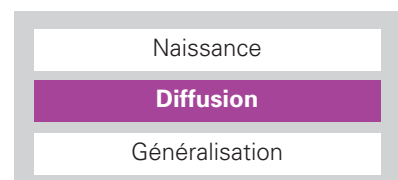
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Dai-

kin (Japon), Stiebel-Eltron (Allemagne), Thermia (Suède), Toshiba (Japon), Trane (États-Unis), York (États-Unis)... ; European Heat Pump Association (www.ehpa.org) ; IEA Heat Pump Centre (www.heatpumpcentre.org).

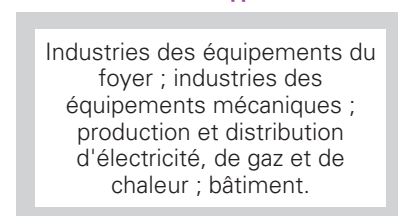
Commentaires

Le couplage d'une pompe à chaleur avec le stockage de calories dans les couches superficielles du sol est le principal concept d'application susceptible d'un très fort développement au cours des prochaines années. En particulier, les « pieux géothermiques » permettent de limiter le coût de l'accès au stockage de calories dans le sol, en combinant l'échangeur avec des fondations sur pieux. Ces technologies vont se développer dans la construction neuve, notamment dans le secteur tertiaire, mais aussi dans le résidentiel collectif.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Énergie – Environnement



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

36. Composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré

Description

Les technologies visant à améliorer le rendement de l'éclairage comprennent un ensemble de briques dont la finalité est double : améliorer le rendement énergétique des dispositifs d'éclairage en maintenant un confort d'éclairage adapté à l'usage, et augmenter la durée de vie des dispositifs sans dégrader leur impact environnemental en fin de vie. Ces technologies comprennent, notamment :

- les dispositifs à diodes électroluminescentes ou DEL (diodes, électronique de commande, luminaires) ;
- les dispositifs de commande « intelligents », de gestion de l'éclairage, parties prenantes de la gestion technique du bâtiment ;
- les tubes fluorescents basse consommation ;
- les technologies de calcul d'éclairage ;
- l'électronique de puissance associée aux nouvelles sources d'éclairage à décharge (ballast).

Verrous

Les verrous à lever concernent aussi bien des briques technologiques de base que des systèmes complets et les incitations d'accès au marché. Il s'agit, entre autres :

- de garantir la qualité de l'éclairage des dispositifs économes. Si la qualité de l'éclairage n'est pas un critère majeur dans une certain nombre de situations ne requérant pas une présence humaine continue, la qualité de l'éclairage apparaît comme un critère fondamental à prendre en compte dans des environnements de travail ou domestiques. Les DEL comme les tubes fluorescents basse consommation n'assurent pas encore un confort d'éclairage du niveau des lampes à incandescence ;

- d'augmenter la durée de vie des dispositifs. C'est particulièrement vrai pour les diodes électroluminescentes blanches : les technologies innovantes ne s'imposeront que si le coût d'usage des technologies ne contre-carre pas les économies réalisées sur la facture énergétique ;

- de disposer de systèmes complets d'éclairage adaptés aux nouvelles technologies. Alors que l'effort a été fait d'inclure des tubes fluorescents dans des conditionnements compatibles avec les douilles pour lampes à incandescence, la diffusion de ces conditionnements pour des DEL blanches reste confidentielle et onéreuse ;

- de réduire le coût des systèmes. Le coût d'une électronique de puissance (ballast) est encore trop élevé pour que les lampes à décharge se diffusent sur l'ensemble des véhicules neufs.

Enjeux, Impact

Le domaine de l'éclairage est à l'heure actuelle un poste majeur dans la facture énergétique des pays industrialisés. En France, l'éclairage fixe, regroupant les éclairages public, domestique, industriel et tertiaire, représente une consommation annuelle d'électricité de 40 TWh, soit 10 % de la consommation électrique globale.

Les industriels et le secteur du tertiaire, dont la facture énergétique est un poste de dépense majeur, ont commencé à mettre en œuvre des technologies permettant de réduire la consommation électrique liée à l'éclairage, en diminuant les frais de maintenance par des dispositifs plus « robustes ». Cette tendance doit se poursuivre pour limiter autant que possible la consommation d'énergie, et de manière liée, l'impact sur l'environnement de l'éclairage. Des expé-

riences dans ce but sont menées pour l'éclairage public dans quelques villes. Cette préoccupation commence à gagner le grand public pour l'éclairage domestique.

Les acteurs de la fabrication des composants sont pour la plupart étrangers, mais des PME existent, qui travaillent sur des systèmes d'éclairage. Ainsi, si l'enjeu de ces technologies est essentiellement environnemental, l'impact potentiel en terme d'activité pour des entreprises françaises n'est pas négligeable.

Le marché automobile est un débouché majeur pour les dispositifs d'éclairage et de signalisation avec 2 millions de nouveaux véhicules particuliers en service chaque année en France (la production mondiale de véhicules à essence est de l'ordre de 64 millions d'unités en 2004, dont 6 millions pour les constructeurs français). Dans le domaine automobile, deux pistes sont actuellement explorées : les lampes à décharge, déjà en service sur les véhicules haut de gamme, et les DEL, utilisées pour l'instant en signalisation et l'éclairage intérieur.

Par ailleurs, la diminution des prix de vente de certains des dispositifs permettra dans le futur une diffusion plus large.

Marché

Dans le secteur non résidentiel, le marché annuel de l'éclairage en France représente un chiffre d'affaires global de l'ordre de 1 Md€. Les seules ventes de lampes dans ce secteur s'élèvent à environ 220 millions d'unités par an, dont plus de 57 % de tubes fluorescents, et moins de 21 % de lampes à incandescence et halogènes.

La diffusion de ces technologies est liée

directement à plusieurs facteurs :

- dans le cadre de l'éclairage public, les évolutions des dispositifs actuels résultent d'un arbitrage entre budget de fonctionnement et investissement public ;
- dans le secteur résidentiel, le facteur prix des équipements et consommables est déterminant. Éventuellement, des dispositifs d'incitation peuvent faire décoller la demande ;
- dans le secteur non résidentiel, l'évolution des systèmes découle naturellement d'un calcul global de coût comprenant investissement et usage.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : Énergies renouvelables-bâtiment (Languedoc-Roussillon), Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre).

■ Liens avec (technologies) : gestion de l'énergie à bord des véhicules ; gestion de la microénergie ; affichage nomade ; matériaux pour l'électronique et la mesure ; procédés et systèmes de photonique.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Ademe (www.ademe.fr), Syndicat de l'éclairage (www.syndicat-eclairage.com).

Industriels : Citélum, Conimast, Éclatec,...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Infineon (Allemagne), Lumileds (États-Unis), Osram (Allemagne), Philips (Pays-Bas)...

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; fabrication de matériel électrique ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ; bâtiment ; travaux publics.

Énergie - Environnement



37. Capture et stockage géologique du CO₂ avec nouvelle conception de centrale à charbon

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Le principe de cette technique consiste à récupérer le CO₂ émis lors de la combustion des énergies fossiles, puis à le stocker dans le sous-sol terrestre. Elle pourrait être mise en œuvre lorsque les émissions sont concentrées en un seul lieu, comme c'est le cas avec les centrales thermiques ou les sites industriels grands consommateurs d'énergie (sidérurgie, cimenteries...).

Après séparation du CO₂ contenu dans les effluents gazeux issus de la combustion, le CO₂ est comprimé puis transporté, par conduite ou par navire, jusqu'au lieu de stockage géologique où il est « injecté » : anciens gisements d'hydrocarbures, aquifères salins, veines de charbon non exploitées... D'un point de vue technique, l'opération s'apparente au stockage souterrain du gaz naturel en aquifère, aujourd'hui bien maîtrisé. Il s'agit ici non pas de stocker le CO₂ de façon définitive, mais pour une durée suffisamment longue, compatible avec la maîtrise de la teneur en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cela suppose notamment la mise en place de systèmes de surveillance des sites pendant toute la durée du stockage.

La stabilité à long terme de ce type de stockage reste à démontrer (absence de fuites, en particulier), et son impact environnemental ainsi que les risques sanitaires restent à évaluer. Par ailleurs, la séparation du CO₂ est très coûteuse en énergie. Cette difficulté peut être contournée de plusieurs façons :

- par l'amélioration des techniques de séparation : lavage par solvants, séparation membranaire... ;
- par la mise en œuvre de techniques d'oxy-combustion (utilisation de l'oxygène à la

place de l'air comme comburant, de façon à obtenir des fumées plus riches en CO₂) ;

- par transformation, en amont, du combustible fossile en hydrogène, avec récupération du CO₂ ; l'hydrogène est ensuite utilisé comme combustible.

La capture et le stockage du CO₂ pourrait concerner en premier lieu le charbon. Il s'agit d'un combustible très abondant, bon marché, avec des sources d'approvisionnement diversifiées ; il est largement utilisé par les nouvelles économies en fort développement, telles que la Chine et l'Inde. Néanmoins, son utilisation entraîne d'importantes émissions de CO₂, nettement plus élevées qu'avec le fioul ou le gaz naturel. L'objectif est, ici, d'associer la capture et le stockage du CO₂ avec des centrales au charbon de conception améliorée (exemples : combustion en lit fluidisé sous pression, gazéification intégrée à cycle combiné), pour lesquelles la concentration en CO₂ des effluents gazeux est plus élevée, et donc sa séparation plus aisée.

Enjeux, Impact

Le protocole de Kyoto a pour objectif la diminution des émissions de gaz à effet de serre, dont le CO₂. La capture et le stockage permettent d'éviter que le CO₂ issu de la combustion du charbon ne soit rejeté à l'atmosphère. Cette solution pourrait ainsi jouer un rôle clé, étant donné la place qu'occupe le charbon dans la consommation énergétique mondiale.

La France possède les compétences lui permettant de mettre au point les équipements et services associés à la capture et au stockage du CO₂. Les conditions sont donc réunies pour la mise en place d'une filière exportatrice, y compris pour les services,

comparable à celle du secteur parapétrolier. Par ailleurs, la mise en place du stockage du CO₂ dans les pays fortement consommateurs de charbon (tels que les États-Unis et la Chine) pourrait représenter, à terme, des investissements de plusieurs centaines de Md€.

Marché

La production d'électricité représente 29 % des émissions de CO₂ au niveau mondial. La capture et le stockage concernent donc en priorité ce secteur. Par ailleurs, 44 % de l'électricité mondiale est actuellement produite à partir de charbon. À moyen terme, la production d'électricité à partir de charbon continuera à jouer un rôle majeur dans les zones disposant de réserves de charbon abondantes : Amérique du Nord, Australie, Chine...

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), énergétique, mécanique des fluides, génie des procédés, génie civil.

■ Compétences technologiques : environnement - pollution, moteurs - pompes - turbines, procédés thermiques.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : BRGM, Cired (CNRS Île-de-France), IFP, Institut de physique du globe de Paris, LSGC (CNRS-Ensic Nancy).

Industriels : Air Liquide (séparation), Alstom, Gaz de France, Géostock, Schlumberger, Total...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Réseau d'excellence européen CO₂ Géonet (www.co2geonet.com) ; Carbon Sequestration Leadership Forum (www.cslforum.org).

Commentaires

La production électrique française étant assurée pour l'essentiel par le nucléaire et l'hydraulique, cette technologie concerne avant tout les marchés internationaux. Plusieurs organismes français, tels que l'IFP et le BRGM, sont d'ores et déjà très impliqués, notamment à travers plusieurs grands projets financés par l'Union européenne.

La capture et le stockage du CO₂ ne sont pas spécifiques aux centrales à charbon. Cette filière pourra concerner tout type de centrale thermique, ainsi que certains sites industriels (cimenteries, hauts-fourneaux...). Toutefois, c'est dans le cas du charbon qu'elle pourrait s'avérer la plus pertinente : cela résulte à la fois du rôle de ce combustible dans le paysage énergétique mondial (et des émissions de CO₂ qui en résultent), et du fait que certaines techniques actuellement en développement (oxycombustion, gazéification...) n'ont réellement d'intérêt que si l'on sait stocker le CO₂. Le projet américain FutureGen en est l'illustration.

Malgré l'urgence d'agir collectivement sur les rejets de gaz à effet de serre, on doit constater que les technologies de capture et de stockage du CO₂ font aujourd'hui encore l'objet de programmes de R&D et de démonstrations. Aucune solution industrielle acceptable économiquement par les pays gros consommateurs de charbon ne sera disponible avant plusieurs années. Il y a là un défi collectif probablement sous-estimé, dont la technologie ne constitue que l'un des aspects.

Ces problématiques représentent une opportunité exceptionnelle de création de valeur pour la France, compte tenu de l'excellence et du positionnement international de « leader » de plusieurs acteurs nationaux du domaine des services en géotechnique.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements mécaniques ; industries extractives ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ; travaux publics.

Énergie – Environnement



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

38. Contrôle-commande des réseaux et de la puissance

Description

La conception traditionnelle des réseaux électriques repose sur une production «centralisée», composée essentiellement d'installations de grande puissance, fonctionnant en base et raccordées en haute tension.

Toutefois, depuis quelques années, la multiplication d'équipements de production de petite taille, en particulier d'équipements à production intermittente (systèmes photovoltaïques, éoliennes), et reliés au réseau d'alimentation générale, en rend le pilotage plus complexe. L'intégration de ces productions décentralisées, mais aussi de capacités de stockage, dans des réseaux conçus pour une production centralisée, peut affecter la qualité de l'énergie électrique, voire compromettre la stabilité du réseau. La possibilité de choisir librement un fournisseur d'électricité vient également renforcer ce besoin d'une évolution de la conception des réseaux.

D'un point de vue technique, de nouvelles approches pour le réglage de la tension et de la fréquence, le filtrage des harmoniques, le contrôle de l'énergie réactive, l'équilibrage entre production et demande... doivent être élaborées. C'est ainsi que l'on a introduit le concept de «réseau intelligent», permettant une gestion plus souple des réseaux. Ceux-ci ne sont plus uniquement gérés de façon centralisée, ils sont aussi partiellement pilotés par les utilisateurs, qu'ils soient clients ou producteurs. Ce type de réseau repose, notamment, sur la mise en œuvre de nouveaux dispositifs tels que :

- des outils de supervision (en particulier logiciels) et de dispatching ;
- des dispositifs de protection (relais numériques, par exemple) ;
- des dispositifs de réglage du transit de l'énergie électrique (FACTS : *Flexible AC*

Transmission Systems) et d'interfaçage des générateurs décentralisés avec le réseau, à base d'électronique de puissance ;

- des infrastructures de communication associées aux réseaux électriques (transmission des données en temps réel), interconnection avec les places de marché... ;

En amont, cela suppose la mise au point de nouveaux modèles et outils de simulation, permettant, en particulier, d'étudier le comportement des réseaux en quasi-temps réel.

Enjeux, Impact

La loi de juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique française a retenu, parmi ses priorités, le développement des réseaux de transport et de distribution d'électricité.

La directive européenne 2001/77, relative à l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables (SER), a fixé comme objectif pour la France une part de 21 % d'électricité SER en 2010, contre 15 % en 1997. Cet objectif ne pourra être atteint, entre autres, que si les conditions techniques d'intégration à grande échelle de ce type de production électrique dans les réseaux le permettent.

Marché

Les entreprises du Gimelec (Groupement des fabricants français d'équipement électrique et électronique) ont réalisé en France, en 2004, un chiffre d'affaires de 9,2 Md€, dont 22 % dans le domaine de l'énergie. Les marchés internationaux sont porteurs, en particulier dans les pays où l'infrastructure électrique doit se développer (Chine, Inde...), mais aussi en Amérique du Nord et en Europe, où plusieurs cas de panne ont fait apparaître un

besoin de renforcement et de modernisation des réseaux d'électricité.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : informatique, automatique, électronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, informatique, semi-conducteurs, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : EnRRDIS (Rhône-Alpes), Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre).

■ Liens avec (technologies) : systèmes photovoltaïques avec stockage intégré ; systèmes éoliens avec stockage intégré ; modélisation, simulation, calcul ; ingénierie des systèmes complexes ; ingénierie des systèmes embarqués.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CNRT-Futurelec (Université de Lille), Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble.

Industriels : Alstom, Amec-Spie, Areva, Cegelec, EDF, Schneider Electric... ; Gimelec (www.gimelec.fr) : Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : ABB (Suède-Suisse), General Electric (États-Unis), Hitachi (Japon), Toshiba (Japon), Siemens (Allemagne)... ; Cigre (www.cigre.org).

org) : Conseil international des grands réseaux électriques ; UCTE (www.ucte.org) : Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity.

Commentaires

La libéralisation des marchés de l'électricité européens s'est accompagnée d'une multiplication des acteurs, qui a elle-même contribué à rendre la gestion des réseaux plus complexe. Par ailleurs, la création d'un grand marché européen, à la fiabilité améliorée, implique le renforcement des interconnexions et une meilleure coordination entre réseaux nationaux. L'électrotechnique et les courants forts sont historiquement un pôle d'excellence français. Soutenus par un important marché intérieur, les acteurs français disposent des moyens de se positionner sur les marchés du futur, notamment la Chine et l'Inde. Absorbés par les conséquences européennes de la dérégulation des marchés de l'énergie, il n'est pas sûr que tous ces acteurs aient saisi les enjeux de ces nouveaux marchés extérieurs, alors que la France dispose de l'expertise et des moyens qui lui permettraient de promouvoir le concept d'une école française de la « sûreté de conception et d'exploitation des grands réseaux électriques ».

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur.

Énergie – Environnement



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

39. Mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents

Description

Outil incontournable de diagnostic, de prévision et d'évaluation, la métrologie occupe une place de plus en plus importante dans le domaine de l'eau.

D'un point de vue technologique, les développements actuels visent à mettre au point de nouveaux systèmes de détection dédiés à un polluant donné, ainsi qu'à améliorer l'instrumentation du point de vue de la précision, de la fiabilité, de la vitesse de mesure, de l'automatisation et de la miniaturisation. Plus généralement, des alternatives à l'approche traditionnelle, qui repose sur le prélèvement d'échantillons sur site suivi d'analyses en laboratoire, sont recherchées.

À terme, l'objectif est de disposer d'une boîte à outil complète, comportant, en plus de l'instrumentation et des méthodes déjà disponibles, de nouveaux dispositifs tels que :

- les systèmes automatisés pour la mesure en ligne et en temps réel ;
- les systèmes miniaturisés à faible coût (biocapteurs, par exemple) ;
- les analyseurs portables de terrain ;
- les systèmes automatiques d'échantillonnage périodique ;
- les capteurs passifs pour la mesure in situ.

Une des priorités est la mise au point de nouveaux outils de mesure des sources de pollution générées par les activités humaines, et plus particulièrement des « nouveaux » polluants, ou polluants « émergents ». C'est le cas, par exemple, des produits pharmaceutiques dont la présence dans l'eau, sous forme de résidus, a été mise en évidence dans diverses études. D'autres polluants, comme les pesticides, les dioxines, les phtalates, les métaux lourds... sont surveillés de

plus longue date et sont d'ores et déjà classés comme prioritaires. Une attention particulière est portée aux produits susceptibles d'affecter le système endocrinien, en raison de leur impact sanitaire potentiel. La nécessité de surveiller ces « perturbateurs endocriniens » peut également impliquer le développement de nouveaux outils de détection et de mesure.

Enjeux, Impact

La directive-cadre 2000/60 relative à la politique communautaire dans le domaine de l'eau (complétée par la directive 2003/210 relative aux eaux souterraines) a pour objectif la protection et l'amélioration de la qualité des ressources en eau de l'Union européenne. Elle implique la mise en place de réseaux de surveillance, nécessitant des moyens de mesure renforcés. La liste des polluants prioritaires, mise à jour tous les quatre ans, comporte actuellement 33 substances.

Par ailleurs, la Commission européenne a mis en place, fin 1999, une stratégie communautaire concernant les perturbateurs endocriniens. Parmi les actions prévues figurent l'identification des substances concernées et l'évaluation des risques associés, ainsi que la mise au point de méthodes de mesure.

Marché

Le marché de la métrologie de l'eau reste très lié à l'évolution de la réglementation : cette dernière se renforçant, les besoins en instrumentation sont en croissance. Toutefois, les États-Unis, l'Allemagne et le Japon sont en position dominante sur ce marché.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie des organismes, chimie physique, chimie analytique, électronique.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, chimie organique, biotechnologies, environnement - pollution.

■ Liens avec (technologies) : technologies physiques amont améliorées de traitement de l'eau, gestion de l'eau dans le bâtiment, acquisition et traitement de données, capteurs intelligents et traitement du signal, matériaux pour l'électronique et la mesure.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Ifos (CNRS-École centrale Lyon), LAAS (CNRS Toulouse), LEOPR (CNRS-Université de Grenoble), LNE, Nancie (Centre international de l'eau de Nancy), OIEAU (Office international de l'eau). Industriels : Anjou Recherche, Bamo Mesures, Datalink Instruments, Degremont, Environnement SA, Iris Instruments, Neosens, Nereides, Secomam...

Des travaux de recherche sont notamment

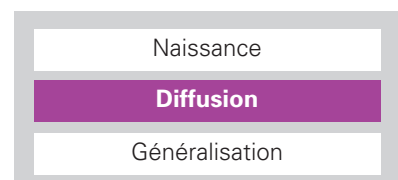
menés dans le cadre du réseau Riteau (www.riteau.org).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Aqua-lyse (Pays-Bas), Bran+Luebbe (Allemagne), Endress+Hauser (Allemagne), Kobold (Allemagne), Honeywell (États-Unis), Horiba (Japon)... ; projet européen SWIFT-WFD (www.swift-wfd.com).

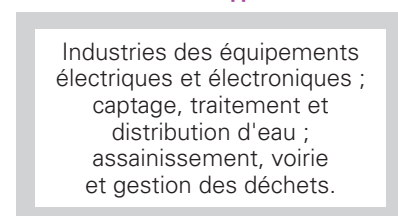
Commentaires

L'« école française de l'eau » est reconnue au plan international. Elle concerne plutôt la gestion de la ressource et son exploitation que la métrologie appliquée correspondante. Avec la raréfaction des ressources (relative par rapport à l'augmentation des besoins) et l'augmentation relative de leur prix, on observera un fort développement des activités de services d'accompagnement, notamment de surveillance et de caractérisation. Ces marchés seront, par nature, dispersés au prorata des consommations, et générateurs d'emplois de service au travers de nombreuses PME-PMI.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Énergie – Environnement



40. Technologies de filtration membranaire (traitement de l'eau)

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les membranes sont utilisées pour la filtration de fluides par différentiel de concentration ou par tamisage. Ce sont des technologies séparatives dites « physiques », qui peuvent se substituer, au moins partiellement, aux technologies traditionnelles, dites « physico-chimiques ».

Le terme de filtration membranaire recouvre en fait toute une famille de procédés qui se distinguent par la taille des « objets » qu'ils peuvent séparer, depuis les macroparticules jusqu'aux ions métalliques. On distingue la microfiltration, l'ultrafiltration, l'osmose inverse. La membrane proprement dite, semi-perméable, peut être organique (matériaux polymères) ou inorganique (céramiques).

Du fait de la multiplicité de ses applications, la filtration membranaire est de plus en plus répandue. Elle est notamment utilisée dans le domaine du traitement des eaux, en particulier pour la production d'eau potable. Les membranes peuvent constituer le cœur du traitement ou encore servir d'étape d'affinage associée à un traitement plus conventionnel (décantation, désinfection chimique...). Fiable, modulaire, la filtration membranaire présente également l'avantage de nécessiter peu de réactifs.

Sa mise en œuvre se heurte souvent à des problèmes de colmatage, d'où l'importance des techniques de nettoyage. Plus généralement, la compréhension du fonctionnement des membranes reste à améliorer. Cela concerne les mécanismes de transport à travers la membrane, de colmatage et de vieillissement, la modélisation des procédés de filtration membranaire...

Enjeux, Impact

La directive européenne de 1998 sur les installations d'eau destinées à la consommation humaine, transposée en droit français en 2001, fixe des limites et références de qualité pour les eaux de consommation, à partir de paramètres biologiques et chimiques. La mise en œuvre des techniques membranaires peut permettre d'atteindre ces objectifs, en particulier dans le cas des polluants microbiologiques et des pesticides.

Marché

Toutes applications confondues, la France constitue le deuxième marché en Europe pour la filtration membranaire ; la microfiltration et l'ultrafiltration en représentent les trois quarts. La filtration membranaire appliquée à la potabilisation de l'eau est apparue dans les années 1990. C'est aux États-Unis que cette application s'est développée le plus rapidement.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie du solide, matériaux, mécanique des fluides, génie des procédés, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : chimie macromoléculaire, matériaux - métallurgie, procédés techniques.

■ Liens avec (technologies) : mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents, gestion de l'eau dans le bâtiment, modélisation, simulation, calcul, fonctionnalisation des matériaux.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : GIE Techno-membranes, LIPE (Insa Toulouse).

Industriels : Anjou Recherche, Aquasource, Degremont, Orelis, Polymem, Tami Indus-

Énergie - Environnement

tries... ; CFM (Club français des membranes) (www.cfm-membrane.com) ; Société française de filtration (www.sffiltration.org) ; Syndicat national des industries de production d'eaux potables, de process et de piscines (SIEP).

Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre du réseau Riteau (www.riteau.org).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Alfa Laval (Suède), Asahi Kasei (Japon), Toray Membrane (Japon), Dow (États-Unis), GE Water (États-Unis), Koch Membrane (États-Unis), US Filter (États-Unis)...

Commentaires

Les menaces qui pèsent sur la ressource en eau, notamment de nature qualitative (nouvelles pollutions comme les perturbateurs endocriniens, par exemple), appellent des réponses toujours plus performantes. En particulier, un des principaux enjeux réside dans le développement de membranes capables de filtrer des molécules spécifiques ou des ions. De nouvelles solutions doivent être mises au point, notamment en faisant appel aux micro et aux nanotechnologies. La France bénéficie d'une excellente position sur ces sujets. Elle doit encourager ces activités fortement créatrices de valeur ajoutée.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; chimie, caoutchouc, plastiques ; captage, traitement et distribution d'eau ; assainissement, voirie et gestion des déchets.

Énergie – Environnement



41. Automatisation du tri des déchets

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Le tri a pour fonction principale de transformer un flux de déchets mélangés et non directement valorisables en plusieurs fractions, dont certaines se prêteront mieux au recyclage matière. De ce point de vue, le tri est une étape intermédiaire du traitement des déchets, les flux sortants étant pris en charge par d'autres filières (recyclage, incinération...).

Si le tri des déchets intègre traditionnellement des étapes de tri manuel, certaines fonctions, comme la séparation des métaux, sont d'ores et déjà prises en charge par des systèmes automatiques. Plus généralement, les propriétés physiques des déchets peuvent être exploitées pour la mise au point de procédés de tri dans lesquels l'intervention humaine est limitée. Les techniques ainsi mises en œuvre sont multiples. On distingue, notamment :

- le tri aéraulique : trommel ou séparateur aéraulique (basé sur les différences de densité, de forme, de portance à l'air...) ;
- le tri magnétique des métaux ferreux, extraction magnétique des non ferreux par courants de Foucault ;
- le tri électrostatique, par exemple pour la séparation entre métaux et plastiques (création d'une charge électrostatique par Corona ou triboélectricité, puis séparation par attraction-répulsion) ;
- le tri mécanique par criblage (séparation en fonction de la forme, de la taille...), par séparateur balistique... ;
- le tri optique par couleur : identification de matières plastiques en fonction de leur spectre infrarouge...

De telles installations associent souvent tri automatique et tri manuel, comme c'est le

cas avec les déchets d'emballages. De plus, il est généralement nécessaire de combiner successivement plusieurs méthodes de tri, selon la nature et les propriétés de la fraction à séparer : métaux, matières plastiques...

Au-delà des questions de productivité, l'automatisation permet aussi d'étendre le tri aux déchets qui ne peuvent pas être séparés par des méthodes manuelles ; un exemple est l'identification des plastiques par trieurs optiques.

Enjeux, Impact

La loi du 13 juillet 1992 avait prévu qu'au 1^{er} juillet 2002, seuls les déchets ultimes seraient admis en décharge, objectif qui n'a pas été entièrement atteint. La prévention et la réduction à la source restent la première priorité en matière de déchets, suivies par le recyclage et la valorisation. Il y a eu dans les années 90 un développement très sensible du recyclage des déchets ménagers et assimilés, mais la valorisation directe, c'est-à-dire le recyclage sans passage dans un centre de tri (cas du verre, du papier...), reste dominante. Tri et recyclage sont des techniques complémentaires. En effet, le recyclage ne pourra progresser sans une amélioration du tri.

Parmi les différents modes de traitement des ordures ménagères et assimilés, le tri est celui qui crée le plus d'emplois. Il s'agit, pour l'essentiel, d'emplois peu qualifiés et considérés comme pénibles (gestes répétitifs, maintien du regard à la recherche des produits, niveau sonore des installations, présence de déchets à risques...). L'automatisation dans les centres de tri peut contribuer à valoriser ces métiers.

Marché

En 2002, en France, 296 installations triaient 5,2 Mt de déchets dont 3,6 Mt ont été valorisés, sur un total de 26,4 Mt de déchets ménagers et assimilés, et 94 Mt de déchets banals des activités économiques et tertiaires. Le tri automatique est un marché naissant en France, hormis dans certains cas spécifiques (véhicules hors d'usage, par exemple). De ce point de vue, la France est en retard par rapport à des pays comme l'Allemagne.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : matériaux, optique, mécanique, automatique, électronique.
- Compétences technologiques : optique, analyse, mesure et contrôle, matériaux - métallurgie, procédés techniques, machines-outils.
- Liens avec (technologies) : recyclage des matériaux spécifiques ; capteurs intelligents et traitement du signal ; procédés et systèmes de photonique.
- Principaux acteurs français
Centres de compétences : BRGM
Industriels : équipements : Delta Neu,

Pellenc Environnement, Raoul Lenoir, Vauche... ; opérateurs de centres de tri : Coved, Onyx, Sita, régies...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Binder+CO (Autriche), Bollegraaf (Pays-Bas), Hamos (Allemagne), Bezner Mashinen (Allemagne), Herbold (Allemagne), Horstmann (Allemagne), LLA Instruments (Allemagne), MDE (Belgique), MSS (États-Unis), SGM Magnetics (Italie)...

Commentaires

Au plan macroéconomique (et thermodynamique...), il convient de souligner que le tri à la source des déchets, par les usagers eux-mêmes, est naturellement beaucoup plus efficace, nonobstant les « erreurs de tri ». Il y a donc globalement compétition (et dans certains cas complémentarité, par exemple tri optique d'emballages plastique prétriés) entre le tri amont et le tri aval. On peut imaginer que le tri aval soit à terme dédié au traitement de flux résiduels de déchets. Il y a un marché en croissance pour le tri en aval des déchets, mais qui, à terme, pourrait évoluer vers un marché de niches.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements mécaniques ; industries des équipements électriques et électroniques ; assainissement, voirie et gestion des déchets.

Énergie – Environnement



42. Accélération de la dégradation des déchets fermentescibles et valorisation énergétique

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les traitements biologiques ont pour objectif de transformer les matières fermentescibles contenues dans les déchets. La fraction solide issue du traitement peut ensuite être valorisée sous forme d'amendement de culture, sous réserve de la conformité du produit à la réglementation (teneurs maximales en polluants, exigences sanitaires...). Ces traitements s'appliquent aux déchets verts, aux déchets des industries agroalimentaires, aux boues de stations d'épuration... ainsi qu'aux déchets ménagers, dès lors que ceux-ci contiennent une fraction organique suffisante.

On distingue deux types de traitement biologique : le compostage (traitement en présence d'oxygène) et la méthanisation (traitement en l'absence d'oxygène). Cette dernière permet la production d'une fraction gazeuse à teneur élevée en méthane, le biogaz, valorisable comme combustible après épuration. La fraction solide résiduelle, appelée digestat, peut être utilisée en agriculture, éventuellement après une étape supplémentaire de compostage.

Les procédés de méthanisation, utilisés de longue date pour traiter les boues de stations d'épuration, sont aujourd'hui maîtrisés, mais restent relativement complexes, en raison de la multiplicité des opérations successives : tri préliminaire des déchets, préfermentation, valorisation du biogaz (dans des chaudières spécifiques ou des moteurs thermiques résistant à la corrosion), stabilisation du compost... De plus, l'étape de méthanisation proprement dite dépend de nombreux paramètres.

L'amélioration de ces procédés passe par l'augmentation du taux de « conversion » des matières fermentescibles et l'accéléra-

tion de la méthanisation. Un des objectifs est de mieux maîtriser la production de biogaz, dont la valorisation énergétique, sous forme de chaleur mais aussi d'électricité éventuellement livrée au réseau, peut conditionner la rentabilité économique de l'installation.

Enjeux, Impact

La méthanisation, qui permet d'allier valorisation énergétique et agronomique, est bien adaptée aux déchets organiques, ou, plus généralement, à la fraction organique des déchets. Elle respecte les principes de la loi du 13 juillet 1992 sur les déchets, participe au bilan énergétique national grâce à la production de biogaz et permet une réduction du volume des boues de stations d'épuration. Toutefois, dans la majorité des cas, elle est assez mal adaptée aux déchets ménagers, à moins d'envisager un tri préliminaire, ou de procéder à un traitement conjoint déchets ménagers-déchets organiques.

Marché

Alors que le compostage s'est développé en France durant les années 90 (233 plates-formes de compostage des déchets verts recensées en 2002), la méthanisation appliquée aux déchets ménagers et assimilés reste très marginale, avec seulement deux unités en activité (contre une soixantaine en Europe en 2001). Les multiples difficultés rencontrées par un des premiers projets français de ce type en sont la raison principale. La méthanisation est plus répandue dans l'industrie, l'agriculture, les stations d'épuration où elle concernerait environ 250 sites en France.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie des organismes, énergétique, génie des procédés.

■ Compétences technologiques : chimie organique, biotechnologies, procédés techniques, environnement - pollution, procédés thermiques.

■ Liens avec (technologies) : biotechnologies industrielles.

■ Principaux acteurs français

Centre de compétences : Inra

Industriels : Arm, Fama, Proserpol, Suez, Valorga, Veolia, Vinci Environnement, Vor Environnement... ; Club biogaz (www.biogaz.atee.fr)

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Ows (Belgique), Linde (Allemagne), Schmack Biogas (Allemagne)...

Commentaires

La pertinence thermodynamique du « recyclage court » des déchets organiques grâce à la méthanisation doit être affirmée. Au-delà de nombreuses activités de R&D et de mise en œuvre de pilotes, l'industrialisation est aujourd'hui la difficulté principale à résoudre : quelles tailles de méthaniseurs par rapport à quels marchés ? Comment maîtriser et réguler les réactions de méthanisation, constamment menacées par les variations de nombreux paramètres (composition des déchets entrants, conditions climatiques, etc.) ?

De nouvelles solutions techniques émergent, qui répondent aux besoins de nouveaux marchés. On observera certainement, au cours des prochaines années, un développement régulier de la méthanisation des déchets fermentescibles, en particulier couplée à une valorisation énergétique généralement combinée (chaleur et électricité).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; industries des équipements mécaniques ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ; assainissement, voirie et gestion des déchets.

Énergie – Environnement



43. Traitement des odeurs non confinées

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Le traitement des odeurs à la source est aujourd'hui bien maîtrisé, grâce à des procédés d'élimination tels que l'oxydation thermique, l'adsorption, l'absorption, la photocatalyse ou les plasmas froids. Le recours à des produits masquants est fréquent, bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler d'un traitement des odeurs. Le traitement des odeurs en milieu ouvert est en revanche plus délicat : la dispersion de produits neutralisants, voire la dispersion des odeurs dans l'atmosphère, font partie des solutions proposées. Dans tous les cas, l'approche doit être couplée à une étude préalable comportant une analyse des conditions météorologiques et de la topographie des lieux. Les solutions sont à adapter au cas par cas, étant donné la variété des sites concernés et la grande variété des molécules rencontrées.

La maîtrise des pollutions olfactives est particulièrement délicate dans le cas des sites à ciel ouvert, dont la surface est importante, et pour lesquels on manque encore de procédés de traitement réellement efficaces.

Cela concerne typiquement les centres de stockage des déchets, pour lesquels la question des nuisances olfactives constitue l'un des principaux motifs de plainte du voisinage. Les sources des odeurs sont les déchets eux-mêmes, en particulier lors de leur déversement, ainsi que les dégagements de biogaz et les émanations dues aux lixiviats. La mise en place de réseaux de captage du biogaz et des lixiviats permet de traiter une partie du problème, mais n'est pas suffisante.

Plus généralement, sont concernés par ce type de nuisance les installations de com-

postage, les stations d'épuration, l'élevage, la production de papier ou de sucre...

Enjeux, Impact

Malgré leur prise en compte dans la réglementation (installations classées, par exemple), les nuisances olfactives sont encore assez mal maîtrisées. C'est essentiellement sous la pression sociale que les pratiques dans ce domaine évoluent. Par ailleurs, certains composés malodorants sont également toxiques (mercaptans, amines...).

Marché

Il n'y a pas de marché global émergent du traitement des odeurs non confinées. On peut, en première analyse, suggérer que le « marché » est égal à la somme des plaintes de voisinage déposées (décharges, usines, etc.), augmentée des « points noirs » connus et référencés, sinon traités (métro, embouchures des tunnels, etc.). Le marché est donc proportionnel à la population des zones urbaines. Certaines niches de marché pourraient s'ouvrir, selon la disponibilité de solutions techniques pour le traitement d'une odeur dispersée (exemple des sucreries).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie moléculaire, physique des milieux dilués, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), mécanique des fluides.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, chimie organique, environnement - pollution.

■ Liens avec (technologies) : modélisation, simulation, calcul.

■ Principaux acteurs français

Industriels : Delamet Environnement,

Énergie - Environnement

Phode, Westrand... ; simulation : Aria Technologies, Siriatech...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Ecolair (Belgique), Vaportek (États-Unis)...

Commentaires

Le traitement des odeurs non confinées correspond à une demande de confort. Dans

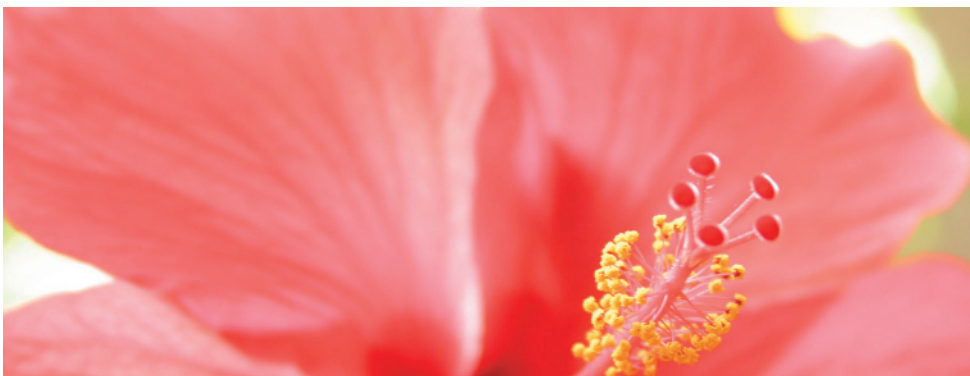
une majorité des cas, un traitement à la source est possible et préférable au traitement « aval » d'une odeur déjà dispersée. On peut raisonnablement soutenir qu'existent une série de « niches » qui appellent des solutions au coup par coup (exemple des décharges de déchets, de toute façon en voie de disparition).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

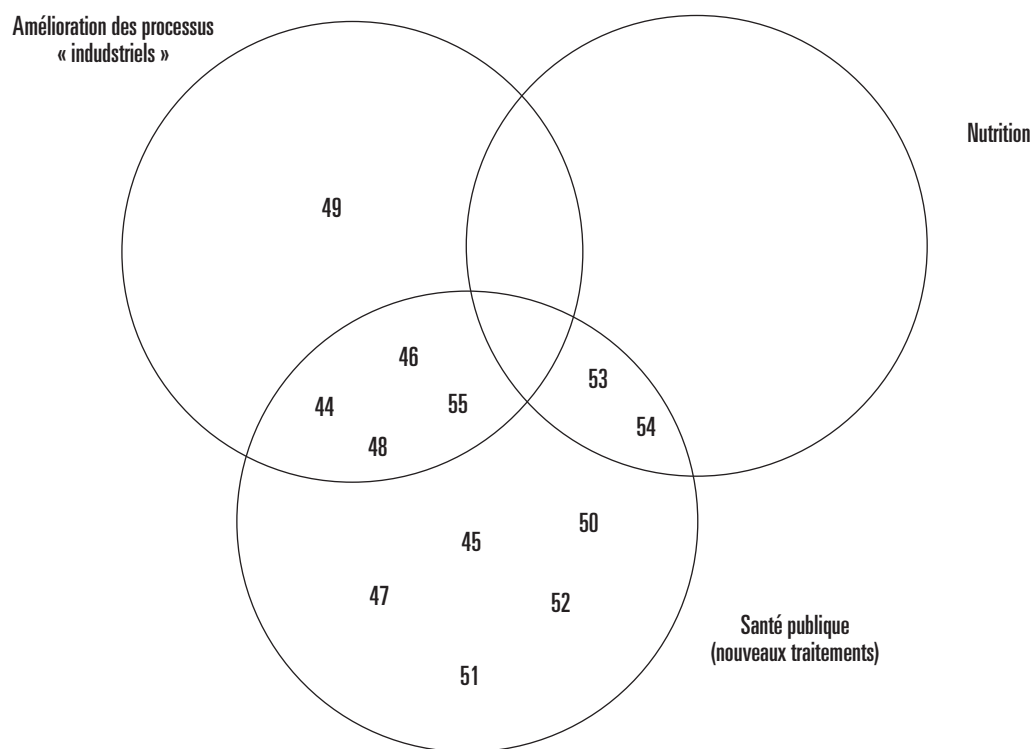
Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; industrie du papier et du carton ; chimie, caoutchouc, plastiques ; assainissement, voirie et gestion des déchets.



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

- 44 Transgénèse
- 45 Thérapie cellulaire
- 46 Protéomique
- 47 Thérapie génique
- 48 Génomique fonctionnelle à grande échelle
- 49 Techniques de criblage et de synthèse à haut débit
- 50 Vectorisation
- 51 Ingénierie des anticorps monoclonaux
- 52 Vaccins recombinants
- 53 Alimentation pour le bien-être et la santé
- 54 Contrôle des allergies alimentaires
- 55 Imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant

Des grands enjeux aux technologies clés



190

Le secteur des technologies du vivant, de la santé et de l'agroalimentaire

Le contexte

Dans le cadre de l'étude, le secteur des

technologies du vivant, de la santé et de l'agroalimentaire a été considéré comme correspondant au domaine des besoins quotidiens. Ce dernier rassemble les activités industrielles et les services qui leur sont liés, et qui ont pour vocation de répondre aux obligations et aux besoins ordinaires de tout individu : se nourrir, se soigner, s'habiller...

Ce secteur, dont le chiffre d'affaires HT en France, en 2004, atteint 278 Md€, inclut l'agriculture, l'industrie agroali-

mentaire, la pharmacie, les produits de toilette (dont les parfums) et détergents et enfin le textile et l'habillement, le cuir et les chaussures. Plusieurs de ces domaines sont des contributeurs de tout premier plan dans la balance commerciale française : l'agriculture et l'industrie agroalimentaire, la pharmacie, les cosmétiques.

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Agriculture	60,9 ^(b)	900	662 000 ^(c)
Industrie agroalimentaire	125,5	386	3 182
Pharmacie	46,0	98,4	277
Produits de toilette (dont les parfums) et détergents	20,4	52,1	293
Textile et habillement, cuir et chaussures	25,4	161,1	2156
Total	278,2	1 597,6	

a : entreprises de 20 salariés et plus

b : production (prix de base)

c : exploitations agricoles : recensement agricole 2000

Source : Chiffres clés des industries - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005) et SCEES (2004)

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Industrie des viandes	30,6	127,6	1 019
Industrie du poisson	3,0	13,6	150
Industrie des fruits et légumes	6,5	22,0	164
Industrie des corps gras	1,7	2,0	28
Industrie laitière	24,3	57,3	321
Travail des grains	4,8	12,1	113
Fabrication d'aliments pour animaux	9,7	19,2	208
Autres industries alimentaires	25,8	93,3	754
Industrie des boissons	19,1	38,9	425
Total industrie agroalimentaire	125,5	386	3 182

(a) : entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés de l'industrie agroalimentaire Agreste - enquête annuelle d'entreprise sur les IAA - Résultats provisoires 2004

Agriculture

Au niveau européen, l'agriculture contribue pour 2,1 % à la valeur ajoutée totale, et occupe 6,3 millions de personnes. Les dix nouveaux pays membres intégrés à l'UE le 1^{er} mai 2004 contribuent pour 9 % à la production agricole de l'UE (la Pologne, la Hongrie et la République tchèque sont les plus importants contributeurs).

En France, le secteur emploie près de 900 000 UTA¹ dont 630 000 non salariés. La production agricole a atteint, en 2004, 60,9 Md€ (source : SCEES, Service central des enquêtes et études statistiques du ministère de l'agriculture et de la pêche), la valeur ajoutée brute engendrée s'élevant à 29 Md€. La valeur de la production a augmenté par rapport à 2003 grâce à l'abondance des récoltes qui a contrecarré la baisse importante des prix des produits végétaux. La France est le premier producteur européen de semences (source GNIS).

Entre 2000 et 2004, le résultat agricole net par actif, en termes réels, a diminué de 1,2 % en moyenne par an.

De manière plus générale et compte tenu du relatif ralentissement attendu de la croissance démographique au niveau mondial, on s'attend à ce que la croissance de la demande mondiale de produits agricoles, qui était en moyenne de 2,2 % ces 30 dernières années, chute à 1,5 % par an dans les 30 prochaines années. Dans les pays en développement, le ralentissement sera encore plus spectaculaire, de 3,7 % à 2 %.

Industrie agroalimentaire

En France, en 2004, le chiffre d'affaires du secteur atteint 125,5 Md€ (HT), (voir tableau ci-dessus).

En 2002 et 2003, la France était le leader européen dans le secteur en termes de chiffre d'affaires et représentait à elle seule environ 20 % du CA européen (UE 25 ; source : CIAA, Confédération des industries agroalimentaires de l'UE).

Avec un CA de 125,5 Md€ en 2004, répartis sur onze domaines d'activité, ce secteur se place parmi les tous premiers contributeurs à l'économie nationale. Il emploie 386 000 personnes dans les entreprises de plus de vingt salariés. Entre 2000 et 2004, le CA de l'industrie agroalimentaire a progressé d'environ 9,5 %. Avec un solde commercial positif d'environ 7,5 Md€ en 2004 (mais en

baisse de 7,4 % par rapport à 2003), l'industrie agroalimentaire est en 3^e position derrière l'automobile et les biens d'équipement comme contributeur à la balance commerciale française, et reste le 1^{er} exportateur mondial de produits transformés.

L'industrie agroalimentaire est un débouché majeur pour l'agriculture nationale dont elle transforme plus de 70 % des produits. La valeur ajoutée de la transformation dépasse celle de la production agricole depuis plus de vingt ans.

Les éléments décrits ci-dessus ne doivent pas faire oublier certaines faiblesses de l'industrie agroalimentaire. Le secteur de l'industrie agroalimentaire est assez peu structuré : sur 11 000 entreprises au total, seulement 3 200 ont plus de vingt salariés. De plus, il n'existe pas de grands leaders mondiaux : Danone, leader français, oscille entre le 10^e et le 15^e rang mondial. Enfin, ce secteur dépend de plus en plus de l'oligopsonne formé par le petit nombre d'entreprises de la grande distribution, aujourd'hui en capacité d'exercer une forte pression sur les marges des industriels alimentaires.

(1) Le nombre d'UTA (Unité de travail annuel) d'une exploitation est la mesure du travail fourni par la main-d'œuvre, en prenant comme standard le travail d'une personne à plein temps pendant une année entière. On inclut dans ce calcul l'activité des personnes de la famille, celle des salariés permanents ou occasionnels et celle des ETA (entreprise de travaux agricoles) et des CUMA (coopérative d'utilisation de matériel agricole).

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Fabrication de produits pharmaceutiques de base	3,7	9,6	30
Fabrication de médicaments	41,3	83,3	217
Fabrication d'autres produits pharmaceutiques	1,0	5,4	30
Total pharmacie	46,0	98,3	277

(a) : entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries de la pharmacie - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

Pharmacie

En France, en 2004, le chiffre d'affaires HT du secteur atteint 46,0 Md€ (voir tableau ci-dessus).

La valeur ajoutée de ce secteur était de 55,1 Md€ en 2001 dans l'UE25, et l'emploi de 550 000 personnes. La France, l'Allemagne et le Royaume-Uni sont les plus grands producteurs, avec des parts de marché de 19 % à 17 % chacun. La production a augmenté à un rythme de 5,6 % par an entre 1993 et 2003. Le Danemark, la Suède et la Belgique ont des industries pharmaceutiques hautement spécialisées.

En France, en 2004, avec 41,3 Md€, la fabrication de médicaments représente à elle seule 90 % du CA de l'industrie pharmaceutique. Le CA de ce secteur a augmenté de près de 35 % entre 2000 et 2004, et 4 500 emplois ont été créés pendant cette période. En 2004, 33,5 % du CA de l'industrie pharmaceutique a été dédié à l'exportation (65 % des exportations ont été réalisées vers l'UE), ce qui fait de ce secteur un des points forts du commerce extérieur français. Cependant, il convient de noter que l'augmentation des emplois et des exportations est principalement due à

l'installation en France de firmes internationales, ce qui peut être susceptible de fragiliser l'économie française en cas de délocalisations.

Parmi les autres produits pharmaceutiques, les dispositifs médicaux (produits de diagnostic, imagerie médicale, prothèses, pansements...) tiennent une place de choix avec un marché mondial de 76 Md€ (source : rapport Jean Marmot). En France, le vieillissement de la population et la demande accrue de soins offrent un potentiel de développement important. En 2003, le CA du secteur a été estimé à 5,2 Md€. Les États-Unis dominent le marché mondial : ils sont le principal pays investisseur dans ce secteur de l'industrie française, la plupart des entreprises de plus de 100 salariés étant des filiales de groupes américains.

La production française est concentrée sur quelques groupes. Le leader français, né de la fusion d'Aventis et de Sanofi-Synthelabo, réalise 28,5 % de la production nationale. L'industrie de la santé et des biotechnologies est relativement concentrée dans les quelques régions françaises qui disposent d'un potentiel scientifique et technique rela-

vement important. L'Île-de-France et, à moindre degré, Paca et Rhône-Alpes cumulent une base industrielle et un potentiel scientifique et technique importants. Le Languedoc-Roussillon, l'Alsace et Midi-Pyrénées disposent d'une activité industrielle importante dans le domaine de la santé, mais leur capacité scientifique et technique apparaît plus en retrait.

Produits de toilette (dont les parfums) et détergents

En France, en 2004, le chiffre d'affaires du secteur atteint 20,4 Md€ (voir tableau ci-dessous).

Avec 52 200 salariés, la France emploie à elle seule quasiment un quart des employés européens du secteur (225 000 au total).

Le secteur regroupe deux activités : la fabrication de savons, de détergents et de produits d'entretien d'une part (21 % du CA en 2004) et la fabrication de parfums et de produits pour la toilette d'autre part (79 % du CA en 2004). Ce deuxième domaine est de loin le plus développé. Il concentre à lui seul 13 % des parts de marché mondial du sec-

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien	4,3	10,0	80
Fabrication de parfums et de produits pour la toilette	16,1	42,2	213
Total fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien	20,4	52,2	293

(a) entreprise de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries des produits de toilette (dont les parfums) et détergents - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Industrie de l'habillement et des fourrures	10,3	57,5	827
Fabrication de produits textiles	4,9	32,5	438
Filature et tissage	5,1	30,1	442
Fabrication d'étoffes et d'articles en maille	1,4	11,3	153
<i>Total industrie textile et habillement</i>	<i>21,7</i>	<i>131,4</i>	<i>1 860</i>
Apprêt et tannage des cuirs	0,3	1,9	35
Fabrication d'articles de voyage et de maroquinerie	1,7	13,9	120
Fabrication de chaussures	1,7	13,9	141
<i>Total industrie du cuir et de la chaussure</i>	<i>3,7</i>	<i>29,7</i>	<i>296</i>
Total textiles et habillement, cuir et chaussure	25,3	161,1	2 156

(a) entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries du textile, de l'habillement, du cuir et des chaussures - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

teur. Le secteur est particulièrement dynamique (son CA a progressé de 22,6 % entre 2000 et 2004) et résolument tourné vers l'exportation : en 2003, son excédent commercial a atteint 5,9 Md€ (source : Sessi). Par ailleurs, la France possède sur son territoire plusieurs géants du luxe : Chanel, LVMH, YSL... et L'Oréal, leader mondial des cosmétiques.

Textile et habillement, cuir et chaussures

En France, en 2004, le chiffre d'affaires (HT) du secteur atteint 25,3 Md€ (voir tableau ci-dessus).

L'industrie textile et de l'habillement employait près de 2,6 millions de personnes dans l'UE 25 en 2003. Jusqu'en 2005, l'Europe a été le 1^{er} exportateur de textiles, et le 3^e de vêtements. La France est le 4^e contributeur en terme de valeur ajoutée, derrière l'Italie, le Royaume-Uni et l'Allemagne.

En France, le chiffre d'affaires de l'industrie du textile et de l'habillement atteint 21,7 Md€ en 2004 dont 47,5 % pour l'habillement et les fourrures, 22,6 % pour les produits textiles (linge de maison, ameublement, tapis et moquettes, non-tissés), 23,5 % pour la filature et le tissage (filature et tissage

du lin, du coton, de la laine, ennoblissement textile) et 6,5 % pour la fabrication d'étoffes et d'articles en maille. La répartition du chiffre d'affaires entre ces différents domaines était du même ordre en 2000 (respectivement 40,9 %, 20,8 %, 30,3 et 8,0 %). L'évolution la plus importante concerne le nombre de salariés : globalement, entre 2000 et 2004, la perte d'emplois est de 27,5 %. Le secteur des produits textiles est le moins touché, avec 13,9 %.

Ces pertes d'emplois s'expliquent par les profondes mutations que l'industrie textile - une des plus anciennes industries françaises - subit depuis 30 ans du fait de l'émergence de nouveaux concurrents issus de pays à faibles coûts salariaux. Depuis 1995, 40 % des entreprises françaises ont disparu suite à la délocalisation d'une partie des moyens de production vers l'Asie et l'Afrique du Nord. La fragilisation de l'industrie textile française et plus largement euro-méditerranéenne a été renforcée depuis le 1^{er} janvier 2005, date à laquelle l'importation des vêtements et produits textiles de Chine n'a plus été limitée (début juin, la Chine a signé un accord avec l'UE qui limite de 8 à 12,5 % par an jusqu'à fin 2007 la hausse de ses exportations d'une dizaine de produits

textiles). La balance commerciale du secteur, déjà déficitaire avant 2005, devrait s'effondrer. Les régions leaders en France sont le Nord-Pas-de-Calais et Rhône-Alpes.

L'industrie du cuir et de la chaussure réalise en 2003 un CA de 3,7 Md€. Elle est principalement composée de deux secteurs, la maroquinerie et la fabrication de chaussures, qui représentent l'un et l'autre quasiment la moitié du CA global et du nombre de salariés (13 900 chacun) ; le troisième secteur est l'apprêt et le tannage du cuir, qui représente 8 % du marché global.

La maroquinerie est un secteur artisanal, qui présente un savoir-faire traditionnel mondialement reconnu. Son chiffre d'affaires et le nombre d'emplois du secteur sont restés stables entre 2000 et 2004. La situation est différente pour le secteur de la fabrication des chaussures qui entre 2000 et 2004 a perdu 27,5 % de son CA et 40 % de ses emplois. La balance commerciale du secteur est déficitaire (de l'ordre de 1,8 Md€ en 2003), essentiellement à cause du secteur de fabrication de chaussures.

Les enjeux de ce secteur

Agriculture

Un enjeu très fort pour l'agriculture tourne autour des « bonnes pratiques » en termes d'occupation du territoire et de valorisation de celui-ci. Les ressources naturelles et l'environnement sont souvent « maltraités » par l'agriculture intensive au point que l'on s'inquiète de la qualité de l'eau ou de l'air, du maintien de la biodiversité, de l'entretien des paysages, des perturbations des climats, de l'aménagement de l'espace. La qualité et la sécurité alimentaires sont parfois prises en défaut consécutivement à des pratiques porteuses de dangers insoupçonnés et à l'inadéquation des contrôles. L'enjeu est d'aborder la problématique par une approche système, visant à développer une ingénierie de l'agriculture durable via la mise en place de techniques alternatives de culture, de nouvelles variétés, de plantes à plus faible besoin hydrique...

Le soutien public de l'agriculture reste coûteux et entraîne des distorsions de concurrence qui sont dénoncées dans les négociations internationales.

Enfin, le secteur agricole est un secteur de faible attractivité pour la main-d'œuvre. Il peut donc y avoir à terme des pénuries temporaires de main-d'œuvre.

Industrie agroalimentaire

Un des enjeux pour ce secteur est de prendre en compte le lien entre nutrition et santé et la demande de la part des consommateurs dans ce domaine. Au-delà de la satisfaction des stricts besoins nutritionnels, certains types d'alimentation pourraient jouer un rôle protecteur voire curatif vis-à-vis de certaines maladies, l'obésité par exemple. Plus généralement, répondre à l'évolution des cultures et des identités alimentaires est un enjeu fort pour l'industrie

agroalimentaire. Il y a une demande générale au niveau du goût, premier critère de choix des consommateurs et aussi au niveau de la qualité nutritionnelle. Dans ce domaine, la France est susceptible d'apporter une « dotation culturelle » riche.

La sécurité alimentaire et son contrôle sont également des enjeux majeurs pour ce secteur. Il s'agit, en synergie avec le secteur de l'agriculture et de la distribution, de répondre à une demande forte de la part des consommateurs mais aussi des autorités (règlements) d'assurer tout au long de la chaîne (production, transformation, distribution) un suivi permettant de répondre aux exigences de sécurité (notamment depuis les crises de l'ESB, de la listéria...). Dans ce domaine, les questions de logistique revêtent une importance particulière pour ces industries (traçabilité).

Enfin, les industries agroalimentaires sont un secteur où la culture du secret industriel conserve un statut important, puisque les formulations-recettes font partie d'un savoir-faire et sont difficilement protégeables. Les industriels de ce secteur sont donc peu enclins aux coopérations, tant entre eux qu'avec le secteur public. Il y a là un problème de gestion de savoir-faire non brevetable. Comment capitaliser ce savoir-faire et les « recettes » ?

Pharmacie

Trouver des solutions pour contrecarrer les effets du vieillissement de la population est un enjeu pour l'industrie pharmaceutique. Le développement des maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson...) et cardiovasculaires, et l'augmentation des dépenses de santé sont les principales conséquences de ce vieillissement. Les pouvoirs publics encouragent la consommation

de génériques dans le cadre de la régulation des dépenses de santé. Bien qu'ils ne représentent encore que 3,1 % du marché des médicaments remboursables, cette part de marché devrait progresser dans les années qui viennent car de nombreux brevets de *block busters* arrivent à expiration.

La compréhension des mécanismes d'émergence des virus représente un enjeu croissant, notamment dans un contexte de mondialisation de l'économie qui stimule la mobilité des personnes et par conséquent la propagation d'éventuelles épidémies.

Certains experts ont mis en évidence la difficulté à faire émerger, au niveau industriel, les compétences et connaissances académiques parfois très poussées des chercheurs français. On déplore de nombreux exemples de brevets abandonnés en France et repris en Amérique du Nord. À titre d'exemple, le dernier système d'imagerie mis au point par le Nobel français Georges Charpak est industrialisé par une entreprise canadienne. Le transfert de technologies est une étape clé et pourtant souvent difficilement réalisée, notamment dans le domaine de la biopharmacie.

Par ailleurs, un besoin essentiel en recherche pour les entreprises pharmaceutiques et de biotechnologies est de développer le maillage des expertises cliniques, pharmaceutiques et d'ingénierie afin de faire évoluer les démarches en R&D vers une approche plus globale : il s'agit notamment de réaliser, en parallèle, recherche fondamentale et clinique, d'anticiper le processus d'industrialisation et de production (Étude du LEEM, Les entreprises du médicament, septembre 2005).

Produits de toilette (dont les parfums) et détergents

La parfumerie, les cosmétiques, le luxe sont des secteurs d'excellence de l'économie française, créateurs d'emplois et de valeur ajoutée. Dans ce domaine, la France bénéficie d'un atout culturel lié à son image dans le domaine du luxe. Mais, outre l'enjeu de la création de nouvelles essences de base pour les parfums, un autre enjeu majeur pour les entreprises est la lutte contre la contrefaçon qui est particulièrement importante pour ce type de produits. Les technologies d'authentification et de traçabilité sont donc un défi pour ce secteur.

Par ailleurs, la cosmétique tend à se rapprocher de la pharmacie du point de vue des exigences de contrôle avant la mise sur le marché. Il y a aujourd'hui de plus en plus de listes de substances et de produits interdits ou toxiques. Dans ce contexte, l'innocuité des composants utilisés dans les produits cosmétiques est un enjeu clé pour l'acceptabilité des innovations.

Textile et habillement, cuir et chaussures

Suite à la délocalisation massive des moyens de production vers l'Afrique du Nord et l'Asie, le déplacement massif de la valeur ajoutée vers l'amont (la création, la recherche) et l'aval (la distribution, le marketing) semble impératif. Dans le secteur du textile, mettre en place des filières de produits à haute valeur ajoutée, comme les textiles techniques et fonctionnels, est un enjeu majeur pour l'avenir de ce secteur.

Dans le secteur de l'habillement, il demeure un enjeu important concernant des marchés de niche : réassortiment, haut de gamme, mode, tendance à la création de minicollections (modèle

Zara) au lieu du rythme semestriel printemps-été et automne-hiver. La lingerie, par exemple, est un des secteurs les plus dynamiques du textile français, et le seul à disposer d'entreprises de production d'assez grande taille (500, 600 personnes). Le consommateur mériterait d'être informé de la qualité des produits, de leur technicité (pictogrammes dédiés à la communication des fonctions cachées des textiles).

Les tendances d'évolution du secteur

Agriculture

Une tendance remarquable concerne la valorisation non alimentaire des cultures. Il s'agit d'utiliser la plante, partiellement ou dans son intégralité, à des fins industrielles. L'innovation repose sur l'utilisation de matières premières renouvelables et s'inscrit dans une logique de développement durable. Les domaines d'utilisation potentiels sont nombreux et variés :

- les besoins énergétiques, en particulier dans le domaine des biocarburants ;
- la pharmacie (production de protéines recombinantes à visée thérapeutique) ;
- la chimie (utilisation en chimie organique de nouveaux composés, issus de la synthèse de produits naturels et non naturels biologiquement actifs) ;
- les cosmétiques (utilisation de substances naturelles en formulation) ;
- la dépollution des sols (utilisation de plantes qui captent et métabolisent les polluants présents dans le sol) ;
- les matériaux (utilisation du bois notamment) ;

Il convient de noter que la France connaît une « artificialisation² » des terres relativement importante, qui est en général irréversible, les surfaces prises ne revenant que rarement à des usages

plus naturels. Dans ce contexte, la valorisation non alimentaire des cultures n'est pas sans soulever des questions concernant une éventuelle compétition des différents usages pour les terres agricoles et arables disponibles.

Par ailleurs, l'utilisation des biotechnologies pour mettre en place des techniques alternatives de culture, des nouvelles variétés, des plantes à plus faible besoin hydrique, ou encore pour réduire l'utilisation des pesticides ou engrais, semble stratégique et incontournable. Ces techniques viendront compléter les méthodes plus classiques (méthodes chimiques) qui devraient à court et moyen termes rester majoritaires. Il s'agit de pouvoir produire « propre » tout en gardant les rendements nécessaires pour répondre aux demandes.

La collaboration étroite entre les botanistes, écophysiologistes, généticiens d'un côté, modélisateurs et mathématiciens de l'autre, doit permettre le développement des modèles mathématiques de croissance végétale. Ces modèles sont calibrés sur une grande gamme de plantes agronomiques et les applications en termes d'exploitation sont désormais envisagées. Il s'agit de modéliser la croissance végétale pour élaborer des outils performants d'aide à la décision (prédiction, optimisation, contrôle optimal : rationalisation de l'apport des ressources en engrais et en eau ou en traitements phytosanitaires, développement des cultures mixtes, contrôle de la qualité des produits...).

Enfin, la mécanisation et la robotisation des tâches pénibles pourraient permettre de faire face à la pénurie de main-

(2) L'urbanisation et la construction des infrastructures détruisent chaque année des milliers d'hectares, et généralement les villes se sont installées sur les terres les plus fertiles. C'est ce que l'on appelle « l'artificialisation » des terres. En France, les espaces bâtis ont augmenté leur superficie de 12 % depuis 1992, les routes et parkings de 10 %, et les sols artificiels non bâtis (jardins, terrasses ...) de 17 % (source : IFEN, Institut français de l'environnement, 2003).

d'œuvre et d'augmenter l'attractivité des métiers agricoles. Ceci est particulièrement vrai pour les métiers de l'élevage, pour lesquels les contraintes sont très importantes.

Industrie agroalimentaire

Sur le sujet nutrition et santé s'ouvre un vaste champ scientifique qu'il convient de mettre en perspective avec les déséquilibres croissants des régimes publics d'assurance maladie : l'« aliment santé » pourrait, dans une certaine mesure, prendre le relais du médicament sur le plan de la prévention.

L'agroalimentaire est un champ naturel d'application des biotechnologies. Mais cette application ne va pas sans difficulté. Certains experts soulignent, en effet, que les acteurs alimentaires privés s'appuient sur des marges significativement plus faibles que leurs homologues du médicament. Ils doutent de leur capacité à financer une R&D en biotechnologie suffisante. Par contre, l'utilisation de nouveaux outils de recherche ou de production, mis au point par ailleurs, est susceptible d'intéresser de très nombreuses entreprises de l'alimentation. Cette diffusion pourrait toutefois être limitée par l'acceptabilité de ces techniques par le consommateur, l'alimentation étant un domaine très sensible par rapport à l'introduction d'innovations porteuses d'une image de « manipulations génétiques ».

Enfin, parmi les technologies pouvant apporter des réponses aux enjeux cités précédemment, les TIC sont envisageables pour la gestion des connaissances et du savoir-faire (par exemple : technologies de « réalité augmentée » en appui à la pérennité du « tour de main »), la traçabilité (contrôle, sécurité), la logistique,

...

Pharmacie

Vue de manière très globale, on remarque que la pharmacie est en train de passer de l'influence de la chimie à celle de la biologie, même si la première reste utile. En 2003, plus de 40 % des nouvelles molécules mises sur le marché sont d'origine biologique. En France, entre 2000 et 2004, le chiffre d'affaires des biomédicaments a triplé (2,21 Md€ en 2004). Ce secteur présente un taux annuel de croissance de 30 %, supérieur au taux mondial sur la même période (18 %). Près de 80 % des biomédicaments commercialisés en 2004 sont indiqués pour traiter des pathologies à fort besoin non satisfait (près de 50 % sont utilisés pour traiter des cancers). L'utilisation de la transgénèse, et plus particulièrement des plantes pour produire des médicaments, est une tendance technologique de tout premier plan. Rappelons que dans ce domaine, le leader mondial, Meristem Pharmaceutique, qui a développé un produit contre la mucoviscidose, est français. La vectorisation, qui vise à améliorer l'efficacité des médicaments et/ou à faciliter leur administration, est aussi un axe de recherche stratégique. Il s'agit d'augmenter la biodisponibilité du principe actif, c'est-à-dire augmenter la quantité de principe actif réellement délivrée à la cible thérapeutique, le reste pouvant être transformé par des enzymes ou bloqué par des membranes. Un deuxième axe de recherche est la mise au point de modes d'administration plus faciles et plus confortables à utiliser pour le patient (on pense notamment à l'insuline inhalée pour le diabète).

Diverses avancées dans le domaine de la pharmaco-génomique, de la biologie et de l'informatique appliquée à la santé (criblage à haut débit, biocapteurs, informatique embarquée dans le corps

humain, biosimulation...) pourraient dans les prochaines années modifier profondément les stratégies thérapeutiques et les industries de santé qui tendront à mieux se coordonner. L'orientation vers une médecine personnalisée pourrait être une des conséquences de cette évolution technologique.

Plus largement, la pluridisciplinarité (biologie, chimie, mathématiques, informatique, statistiques...) doit permettre d'apporter à l'industrie pharmaceutique des méthodes élaborées par la recherche publique pour la biologie à grande échelle et à haut débit, ou pour l'aide au diagnostic et à la décision de traitement. Le développement de modèles mathématiques de simulation devrait permettre de raccourcir la durée du développement d'un médicament actuellement trop long, trop risqué pour les industries pharmaceutiques, et trop coûteux pour la société. L'objectif est aussi d'obtenir des traitements plus ciblés dès la recherche initiale afin d'être le plus efficace possible et, bien sûr, le moins toxique. Il y a là, malgré les faiblesses de la France, une réelle opportunité à saisir pour inverser la tendance.

Produits de toilette (dont les parfums) et détergents

Efficacité et innocuité sont les deux facteurs clés qui orientent les axes de recherche dans ce domaine. Par ailleurs, les technologies utilisées en pharmacie sont parfois appliquées en cosmétique. La vectorisation, par exemple, est une des tendances technologiques développées pour augmenter l'efficacité des principes actifs. Il convient, enfin, de noter le fort intérêt porté aux substances naturelles en remplacement des conservateurs chimiques classiques.

Textile et habillement, cuir et chaussures

Les textiles techniques et fonctionnels constituent une réponse sectorielle face au défi de la mondialisation. Il s'agit d'un vaste ensemble de textiles élaborés pour répondre à un cahier des charges particulier. Les textiles techniques et fonctionnels remplissent un grand nombre de fonctions dans plusieurs domaines d'application (habillement, médical, transport, environnement, etc.) :

- fonctions mécaniques : contention, fixation, élasticité ;
- fonctions d'échange : filtration, isolation, perméabilité, absorption, respiration...
- fonctions de protection : thermique, comportement au feu, chimique, imperméabilité ;

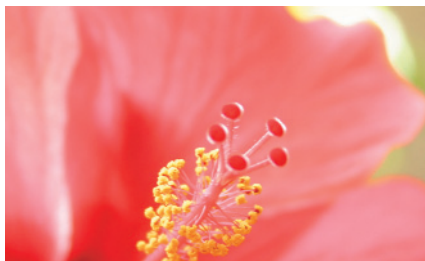
- fonctions dans le domaine du vivant : biocompatibilité, biodégradabilité, fonctions antibactériennes, antiacariens...

La mise en place de nouveaux processus de fabrication pour relativiser la part de la main-d'œuvre dans le prix du produit est aussi une tendance technologique forte : il s'agit essentiellement de procédés de fabrication de produits non tissés tels que des matériaux souples produits à partir de fibres naturelles ou synthétiques, sans passer par les traditionnelles étapes de filature, de tissage ou de tricotage.

Dans le domaine de l'habillement, du linge de maison ou des textiles pour intérieur de voiture, la personnalisation (*mass customization*) peut être une réponse face à la production de masse (production de séries courtes, finissage

à la demande, utilisation de l'impression numérique...). D'autres technologies sont susceptibles d'apporter une rupture indispensable pour pénétrer des marchés de niche : la conception assistée par ordinateur dans la filière textile - confection-distribution, la visualisation 3D pour le consommateur de l'article conçu par ordinateur (costume homme, soutien-gorge Wacaol par exemple), l'apport de la sensation tactile de l'étoffe dans ces ventes immatérielles (dans ce domaine, les jeux sur ordinateur progressent dans l'apport des sensations haptiques, un transfert de technologies serait judicieux à promouvoir).

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



44. Transgénèse

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La fonction transgénèse correspond à la modification du génome d'un organisme par génie génétique. Elle permet une intégration stable de l'ADN étranger et peut être réalisée dans des micro-organismes, des cellules de plantes ou d'animaux. C'est un moyen de tirer partie de la variabilité génétique pour adapter les plantes et les animaux aux besoins socio-économiques.

Le succès de telles pratiques réside principalement dans leur acceptabilité par les consommateurs. Globalement, les applications agroalimentaires du génie génétique sont davantage contestées par le grand public que les applications médicales (même si le champ de maïs transgénique de Meristem, destiné à produire de la lipase gastrique utilisée contre la mucoviscidose, a été fauché).

Au niveau mondial comme à l'échelle française, peu de partenaires industriels sont impliqués. Il existe un réel fossé entre l'état d'avancement des travaux académiques et l'industrialisation qui pourrait en découler.

Enjeux, Impact

L'enjeu pour la France de la maîtrise de cette technologie est de :

- répondre au besoin en terme d'ingénierie de l'agriculture durable (diminution significative des traitements insecticides et herbicides, économie d'utilisation de l'eau pour l'irrigation, changement des pratiques culturelles vers une simplification du travail du sol) ;
- trouver des sources de protéines recombinantes comme les hormones pour traiter les maladies chroniques non transmissibles qui devraient représenter 73 % des décès dans les pays développés d'ici à 2020.

Au niveau réglementaire, la directive

2001/18/CE relative à la coexistence des cultures, à la transparence, à la mise sur le marché, à l'information du public, à la surveillance des risques, à l'étiquetage, est complétée par les réglementations CE 1829/2003 et 1830/2003.

L'impact sur la protection de l'environnement, sur la qualité sanitaire et nutritionnelle des aliments et sur l'apparition de nouveaux traitements médicaux issus de la transgénèse devrait se faire sentir d'ici 5 à 10 ans.

Marché

Les marchés de la transgénèse sont l'agriculture, la recherche et la santé :

- agriculture : plantes à plus faible besoin hydrique, plantes aux qualités nutritionnelles améliorées, simplification de l'agriculture, augmentation des rendements... ;
- recherche : production d'organismes transgéniques modèles de maladies pour tester des candidats médicaments ;
- santé : production de médicaments (protéines recombinantes : hormone de croissance, insuline ; vaccin contre l'hépatite B...), aliments santé (production d'aliments enrichis en éléments favorables pour la santé), xéno-greffe (transfert de cellules, d'un tissu ou d'un organe, entre deux individus qui appartiennent à des espèces différentes).

Soixante-dix millions d'hectares d'OGM sont cultivés dans le monde (5 % des terres cultivées). Le potentiel de diffusion de la technologie est dans ce domaine très important, notamment dans les pays en voie de développement (la Chine par exemple). Dans le domaine de la santé, 10 % du marché pharmaceutique mondial est aujourd'hui issu des biotechnologies. On estime que ce chiffre pourrait atteindre 25 % dans dix ans. Le marché des PMP (*Plant made pharmaceuticals*)

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

devrait atteindre 2,2 Md\$ aux États-Unis et 1,5 Md\$ en Europe, en 2011.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, neurosciences, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Innovation dans les céréales (Auvergne), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : génomique fonctionnelle à grande échelle ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit, ingénierie des anticorps monoclonaux ; vaccins recombinants ; alimentation pour le bien-être et la santé ; contrôle des allergies alimentaires ; carburants de synthèse issus de la biomasse ; biotechnologies industrielles.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cirad, Inra, Inserm, CNRS, Institut Pasteur (Pour en savoir plus: www.inra.fr/Internet/Directions/DIC/ACTUALITES/DOSSIERS/OGM/OGM.htm).

Industriels : Bioprotein, Genoway, Lemmagine, Meristem, Nucleis, Sanofi Pasteur, Vivalis.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Novartis Seed (Suisse), Monsanto (États-Unis).

Commentaires

Les efforts de la recherche publique doivent se poursuivre mais le tissu industriel et l'opinion publique français ne permettent pas un transfert de technologie satisfaisant. Peut-être serait-il souhaitable que les centres de recherche publique se tournent vers des industriels d'autres pays européens pour valoriser leurs savoir-faire ?

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

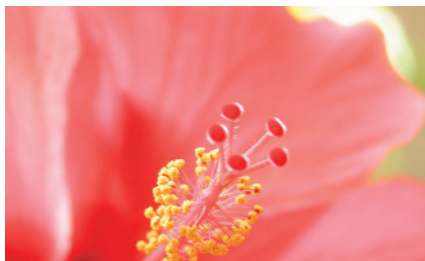
Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; chimie, caoutchouc, plastiques ; recherche et développement ; santé, action sociale.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



45. Thérapie cellulaire

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La thérapie cellulaire est une technique médicale permettant de traiter trois grands types de pathologies : les cancers, les maladies neurodégénératives (Parkinson, Alzheimer, Huntington...) et les pathologies entraînant la destruction de cellules, tissus ou organes (cœur : infarctus, foie : cirrhose...). Cette technique consiste en l'apport à un organisme de cellules pour prévenir, traiter ou atténuer une maladie. Les cellules peuvent venir du patient lui-même ou d'un donneur compatible. Aujourd'hui, plusieurs types de cellules sont utilisés :

- des cellules hématopoïétiques souches et primaires (cellules sanguines ; technologie mature) ;
- des cellules différenciées adultes (cellules spécialisées au niveau morphologique et/ou physiologique, par exemple cellule musculaire, de foie, de rein... ; technologie en croissance) ;
- des cellules souches adultes (les cellules souches sont des cellules non différenciées qui possèdent à la fois la capacité de se multiplier par divisions successives pendant une période indéfinie, et celle de donner naissance, dans des conditions déterminées, à une ou à plusieurs lignées d'éléments cellulaires différenciés ; technologie émergente) ;
- des cellules souches embryonnaires (technologie embryonnaire).

La maîtrise des cellules souches et de leur différenciation est essentielle au développement de cette technologie. Par ailleurs, à l'échelle industrielle, les procédés de fabrication mettent en œuvre des méthodes très innovantes, qui nécessitent la mise en place d'équipes multidisciplinaires.

Enjeux, Impact

Il est crucial de pouvoir trouver des traitements pour les maladies neurodégénératives, compte tenu du vieillissement de la population. En effet, en 2020, 26,8 % de la population française aura plus de 60 ans, et déjà, plus de 100 000 nouveaux cas de la maladie d'Alzheimer apparaissent chaque année. La maîtrise de la thérapie cellulaire pourrait permettre de faire face à cet enjeu. Les enjeux éthiques et réglementaires qui entourent cette technologie sont à prendre en compte :

- suite à la loi Bioéthique (n° 2004-800 du 6 août 2004), l'agence de la biomédecine a été créée en mai 2005. Cette agence délivrera les autorisations concernant les recherches sur l'embryon et les cellules embryonnaires. La recherche sur les embryons surnuméraires issus de la fécondation in vitro et ne faisant plus l'objet d'un projet parental est interdite. L'importation de cellules embryonnaires est en revanche autorisée ;
- le contexte réglementaire européen est flou pour les procédés de thérapie cellulaire. Les différences réglementaires importantes d'un pays à l'autre sont actuellement le frein le plus important du marché de la thérapie cellulaire. L'harmonisation est prévue pour 2006.

L'importance des impacts du développement des procédés de la thérapie cellulaire est soulignée par le choix de la médecine cellulaire comme un des axes technologiques du pôle (projet mondial) Meditech Santé (Île-de-France).

L'horizon temporel prévisible de l'impact (apparition de nouveaux traitements médicaux) peut être estimé à 5 - 10 ans.

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

Marché

La santé est le domaine d'application privilégié de la thérapie cellulaire. De nouveaux traitements pour les maladies neurodégénératives et les pathologies entraînant la destruction des cellules (infarctus, cirrhose, greffes de peau...) pourraient être mis au point via cette méthode.

Il s'agit d'un marché de niche. En 2002, la thérapie cellulaire représentait moins de 1 % des ventes du marché biopharmaceutique mondial, mais à long terme la résolution des principaux défis (scientifiques, réglementaires, éthiques) devrait contribuer à la croissance du marché. Le marché mondial de la thérapie cellulaire devrait avoisiner 26 Md€ en 2010.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, physico-chimie de la pharmacologie, neurosciences, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Méditech Santé (Île-de-France).

Liens avec (technologies) : thérapie génique.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : IGR (Institut Gustave Roussy), projet I-Stem.

Industriels : Myosix, Anosys, Innate Pharma. L'Association française contre les myopathies (AFM) a décidé de soutenir le projet I-Stem (Institut des cellules souches pour le traitement et l'étude des maladies monogéniques), avec l'Inserm et le Généthon : ce projet a pour objectif, durant les deux prochaines années, de s'assurer de la pertinence et de la faisabilité des recherches sur les cellules souches embryonnaires.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Advanced Cell Technology (États-Unis), Cythera (États-Unis), Novocell (États-Unis), Bresagen (Australie).

Commentaires

L'environnement académique français est particulièrement développé et performant : entre 2000 et 2004, l'IGR a déposé 41 brevets et effectué 2 247 publications. Par ailleurs, les acteurs industriels présents sur le territoire possèdent dans leur « pipeline » plusieurs produits en phase clinique (phases I et II). L'effort de recherche est à poursuivre dans ce domaine.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

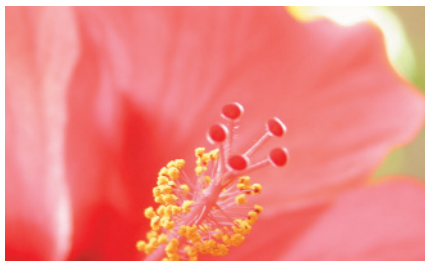
Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ;
recherche et développement ;
santé, action sociale.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



46. Protéomique

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La protéomique étudie des ensembles de protéines : leur rôle, leur structure, leur localisation, leurs interactions... Le développement de la protéomique repose sur les avancées technologiques et sur les progrès récents dans la connaissance des génomes. Plusieurs protéines peuvent être codées par un même gène, donc un organisme possède une très grande diversité de protéomes alors qu'il ne renferme qu'un seul génome.

Grâce aux techniques actuelles d'analyse et de séparation des protéines (électrophorèse bidimensionnelle, spectrométrie de masse) et grâce à la bioinformatique, on peut étudier, simultanément, des milliers de protéines. On peut ainsi identifier la protéine (ou les interactions entre différentes protéines) responsable(s) d'une maladie chez l'homme - pour mettre au point un médicament, par exemple - ou d'une propriété intéressante chez une plante.

Cette évolution correspond à une véritable rupture dans la vitesse d'acquisition des données protéomiques, ce qui ouvre des perspectives originales dans divers domaines : identification de nouvelles cibles thérapeutiques, mise en évidence de propriétés d'intérêt chez une plante (résistance à la sécheresse par exemple) ... D'autres domaines d'applications pourraient profiter des retombées de la protéomique : l'agroalimentaire (évaluation de la sécurité des aliments), le diagnostic clinique, la thérapie génique, la défense (lutte contre le bioterrorisme), l'oncologie, la prévention des maladies...

Enjeux, Impact

La protéomique fait partie des outils dont la maîtrise est essentielle car à l'origine des progrès dans les sciences du vivant et de la

santé. Le développement de ces technologies représente donc un enjeu pour le développement des sciences du vivant et des biotechnologies en France.

Par ailleurs, la protéomique est un moyen (avec la biologie structurale) de tirer parti des découvertes réalisées en génomique. Après le décryptage du génome humain, la maîtrise de cette technologie est donc cruciale pour le devenir des biotechnologies françaises.

L'horizon temporel prévisible de l'impact de cette technologie est de 5 - 10 ans.

Marché

Le marché mondial de la protéomique a été évalué en 2003 à 1,52 Md\$, et devrait atteindre 2,68 Md\$ en 2008. Ce marché très actif est en pleine croissance, à un taux de 12 % par an en valeur. La séparation et la caractérisation de protéines sont les deux segments principaux de ce marché. Ensemble, ils représentent près de 90 % du marché global.

Le marché européen représente 40 % du marché mondial (45 % pour les États-Unis et 10 % pour le Japon).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, neurosciences, médecine et odontologie, informatique.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, informatique, ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires, environnement-pollution.

■ Pôles de compétitivité : Innovations thérapeutiques (Alsace), Méditech Santé (Île-de-France).

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

■ Liens avec (technologies) : génomique fonctionnelle à grande échelle ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; vaccins recombinants ; gestion et diffusion des contenus numériques.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Génopole d'Évry, Institut Pasteur, Rhône-Alpes Génopole.

Industriels : Biomérieux, Hybrigenics, Proteus, Sanofi-Aventis.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Amersham Pharmacia Biotech/Amersham

PLC. (Royaume-Uni), Agilent Technologies (États-Unis), Genomic Solutions INC. (États-Unis), Zyomyx (États-Unis).

Commentaires

Cette technologie fait appel à des compétences multidisciplinaires (génomique, informatique, biologie structurale...) : il est essentiel de réunir ces compétences pour développer cette technologie. Les plates-formes des génopoles d'Évry et de Grenoble s'inscrivent dans cette démarche.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

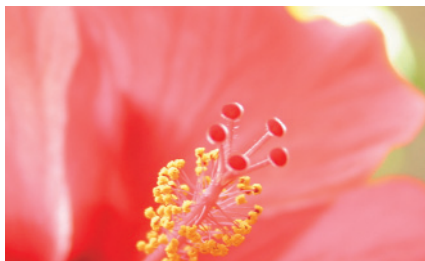
Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; recherche et développement.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



47. Thérapie génique

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La thérapie génique consiste à introduire dans une cellule cible un gène d'intérêt thérapeutique pour qu'il produise une protéine manquante (cellule déficiente) ou un signal qui conduira à la mort cellulaire (cellule infectée ou cancéreuse).

La thérapie génique repose sur :

- un gène-médicament ;
- un vecteur pour le transporter ;
- une cellule cible où le gène puisse s'exprimer.

Les maladies concernées par la thérapie génique sont extrêmement nombreuses et variées : cancers, maladies cardiovasculaires, maladies infectieuses, maladies génétiques, maladies auto-immunes...

Aujourd'hui, une meilleure connaissance des voies d'insertion des vecteurs et de la localisation dans le génome du gène pathologique est indispensable au développement de cette méthode. Les systèmes de transferts de gènes doivent être sûrs, efficaces, capables d'exercer leur fonction dans des cellules qui ne se divisent pas et assurer la stabilité de l'expression du gène thérapeutique.

Enjeux, Impact

La thérapie génique est susceptible de répondre à un enjeu essentiel de santé publique, par exemple développer de nouveaux traitements médicaux (le spectre des maladies concernées par la thérapie génique est très large), et plus précisément trouver des solutions pour certaines maladies pour lesquelles aucun autre type de traitement n'a pu être mis au point.

Il convient de noter que les enjeux éthiques relatifs à cette technologie sont très importants. Le risque d'eugénisme lié à la pratique de la thérapie génique est grand. Le CCNE

(Comité consultatif national d'éthique) a demandé l'exclusion de la thérapie génique germinale (la thérapie génique germinale est la modification du capital génétique des cellules reproductives, ovocytes et spermatozoïdes et leurs précurseurs, ce qui aurait pour conséquences une modification du génome de tout l'individu). Par ailleurs, le CCNE a émis plusieurs avis demandant la prudence quant à l'utilisation et à la « médiatisation » de la thérapie génique. La thérapie génique n'est pas la solution miracle, et la déception provoquée par les premiers échecs peut être encore plus grande que l'espoir soulevé, notamment auprès des malades et de leurs familles.

L'horizon temporel prévisible de l'impact (mise au point de nouveaux traitements médicaux) est de 5 - 10 ans.

Marché

Le marché de la thérapie génique est celui de la santé, et les domaines d'application d'une telle technique sont très variés : diabète, maladie de Parkinson, myopathie de Duchenne, hémophilie A, mucoviscidose, maladies cardiovasculaires, maladies infectieuses (sida, hépatite B, paludisme...), cancers...

En 2005, 425 essais cliniques sont en cours dans le monde : 66 % concernent le traitement de cancers, 9 % des maladies héréditaires monogéniques, 8 % des maladies cardiovasculaires et près de 7 % des maladies infectieuses. Seuls 18 de ces 425 essais cliniques sont en phase III. La grande majorité est en phase I (63 %), ce qui traduit la nature émergente de cette technologie (Pour en savoir plus www.wiley.co.uk/genmed/clinical/).

Le marché mondial des produits issus de la

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

thérapie génique a été évalué à 5,73 Md\$ pour 2011.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, neurosciences, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, biotechnologies.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : thérapie cellulaire, vectorisation.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inserm, Généthron, UCG (Nantes).

Industriels : Cayla, Cellectis, Genopœtic, In-Cell-Art, Sanofi-Aventis, Transgène.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Avigen (États-Unis), Cell Genesys (États-Unis), Introgen Therapeutics (États-Unis), Genvec (États-Unis), Vical (États-Unis).

Commentaires

L'environnement français est particulièrement bon dans ce domaine, tant au niveau académique qu'au niveau industriel. En 2000, les premiers essais ont été réalisés en France, à l'hôpital Necker, sur les « bébés-bulles » par l'équipe du professeur Alain Fisher. Ces essais ont depuis été interrompus après l'annonce d'un premier cas de leucémie chez un des dix patients traités. Au niveau industriel, l'entreprise Transgène mène actuellement plusieurs essais cliniques (1 en phase I, 3 en phases II, 1 en phase III). Sur les 425 essais cliniques en cours dans le monde, 18 sont réalisés en France.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

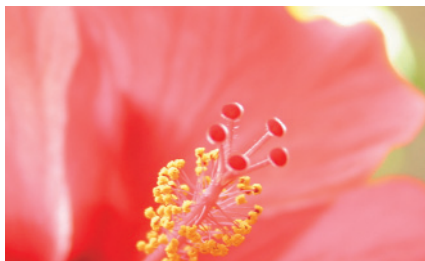
Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ;
recherche et développement.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



48. Génomique fonctionnelle à grande échelle

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La génomique fonctionnelle étudie la fonction des gènes, leur expression, leur régulation, et leur interaction. Elle nécessite l'étude des ensembles de protéines issues des gènes. Le génotypage est une approche qui permet de caractériser les variations génétiques dans le génome humain et d'identifier les mutations qui sont impliquées dans l'apparition de maladies.

Grâce à la mise en place, au niveau mondial, d'infrastructures à grande échelle comme support, le génotypage s'affirme maintenant comme une méthodologie clé dans l'étude des maladies multifactorielles complexes (maladies cardiovasculaires, diabète, asthme, cancer...).

Les technologies de génotypage, appliquées à l'étude des maladies, peuvent être transférées à d'autres secteurs, notamment le secteur agronomique (plantes, animaux domestiques) mais également dans le domaine judiciaire (empreinte génétique).

Actuellement, les développements en cours en France intéressent les méthodologies de détection rapide (et à grande échelle) des mutations, à faible coût, notamment par spectrométrie de masse Maldi (*Matrix-assisted desorption/ionization*).

Cette approche va s'enrichir progressivement, au cours des prochaines années, de nouvelles technologies de génomique fonctionnelle (phénotypage moléculaire) qui vont renforcer la puissance des études génétiques. Le phénotypage moléculaire nécessite, au départ, l'analyse de très grandes cohortes de populations pour établir des corrélations fiables entre des biomarqueurs spécifiques particuliers et le risque de progression d'une maladie ou la réponse thérapeutique.

Enjeux, Impact

Dans le domaine de la santé, l'émergence de ces technologies à grande échelle, qui fait suite au séquençage complet du génome humain, conduit à une réorganisation fondamentale de la recherche biomédicale au niveau mondial. Elle constitue un secteur stratégique pour le développement de tests de diagnostic des maladies, de médicaments hautement spécifiques, avec comme objectif, à l'horizon 2015, la mise en place des premiers protocoles de médecine personnalisée.

Dans le domaine de l'agriculture et de l'agroalimentaire, l'enjeu pour ces techniques est la mise au point de nouvelles cultures aux performances améliorées (qualités nutritives augmentées, augmentation des rendements, diminution du besoin de pesticides et d'engrais...). Les recherches en génomique peuvent servir à améliorer les outils d'évaluation de la sécurité des nouveaux aliments.

En cela, cette technologie aura un impact sur la santé (mise au point de nouveaux traitements médicaux) et sur la qualité sanitaire et nutritionnelle des aliments, qui se trouveront améliorés.

L'horizon temporel prévisible de l'impact peut être estimé à 5 - 10 ans, voire 15.

Marché

Cette technologie peut être appliquée à trois domaines :

- la santé : traitement de maladies complexes (maladies cardiovasculaires, diabète, asthme, cancer...) ;
- l'agriculture et l'agroalimentaire : amélioration des plantes, amélioration des produits animaux ou végétaux destinés à la consommation humaine... ;

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

- la justice : empreintes génétiques.

Le marché potentiel est donc considérable, dans la mesure où les applications visées touchent notamment à des problèmes de santé très répandus dans les pays développés (diabète, cancer, maladies cardiovasculaires).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, chimie analytique, sciences médicales et alimentation, neurosciences, médecine et odontologie, biologie des populations et écologie, informatique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : informatique, analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Innovations thérapeutiques (Alsace), Innovation dans les céréales (Auvergne), Méditech Santé (Île-de-France), Prod'Innov (Aquitaine).

■ Liens avec (technologies) : transgénèse ;

traçabilité ; technologies d'authentification ; protéomique ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; modélisation, simulation, calcul.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CNG, CNRS, Génoplante, Inra, Institut Curie, IRD.

Industriels : Biogemma, Limagrain, Sanofi-Aventis, Genfit.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Aclara Biosciences (États-Unis), Affymetrix (États-Unis), Caliper Technologies (États-Unis), Diversa (États-Unis), Incyte Pharmaceuticals (États-Unis).

Commentaires

La France, en 5^e position, avec 5,9 % de la production mondiale en terme de publications, possède dans le domaine de la génomique un écosystème académique particulièrement riche. Le Centre national de génotypage (CNG) a été un des deux premiers centres mondiaux (le second étant aux États-Unis) créés dans le domaine du génotypage, en 1997.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

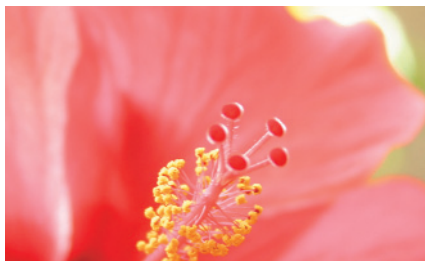
Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; recherche et développement.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



49. Techniques de criblage et de synthèse à haut débit

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Par techniques de criblage et de synthèse à haut débit on entend :

- le criblage à haut débit (HTS - *High Throughput Screening*) réel. Le développement de la génomique et de la protéomique a conduit à la découverte de nombreuses cibles thérapeutiques, constituant ainsi des ciblothèques. Parallèlement, les progrès de la chimie combinatoire (méthode de recherche pharmaceutique qui consiste à synthétiser, de manière automatique, un grand nombre de molécules de structures apparentées) ont permis de synthétiser des banques de molécules, potentiellement actives, à tester. Pour tirer partie de ces améliorations, des techniques de tests à haut débit (criblage) sont mises en place pour découvrir, à partir de ces chimiothèques et de ces ciblothèques, des molécules aux propriétés nouvelles biologiquement actives.

Les verrous principaux qui freinent le développement de ces technologies sont techniques. Ils concernent :

- le choix de la cible : une des questions est de savoir s'il est préférable de choisir une cible issue de la génomique ou de privilégier l'étude d'une cible connue ayant déjà apporté des résultats intéressants. Par ailleurs, manipuler un seul gène cible ou une seule protéine cible ne permettra pas, dans tous les cas, d'obtenir des résultats satisfaisants (cas des maladies multifactorielles) ;
- la mise au point d'essais biologiques robotisés pertinents : il est bien sûr intéressant de mettre au point des tests permettant d'évaluer l'activité mais aussi la toxicité, l'absorption, la distribution, la métabolisation du composé en vue des essais cliniques ;
- la gestion de la masse de données produi-

tes (jusqu'à 50 à 100 000 molécules par mois et par chercheur) ;

– l'approvisionnement en molécules : la tendance est plutôt à la conception rationnelle de chimiothèques ciblées, de plus petite taille.

Cette technique de criblage à haut débit a été étendue à d'autres domaines des biotechnologies, comme la mutagenèse dirigée qui nécessite des outils de tests à très haut débit ;

- le criblage virtuel. Il s'agit d'une modélisation (simulation virtuelle) de l'action thérapeutique de molécules sur une cible, qui pourrait se substituer en partie aux essais réalisés in vitro, ou du moins avoir pour objectif d'effectuer une présélection des molécules à tester in vitro. On parle de tests in silico. Cette technologie fait appel aux progrès récents de plusieurs disciplines : la biologie moléculaire, la biologie structurale (détermination de la structure tridimensionnelle de la cible), la bioinformatique, les mathématiques (voir la fiche Modélisation, simulation, calcul) ;

- l'expérimentation à haut débit (HTE - *High Throughput Experimentation*). Cette technologie a pour but d'accélérer le processus de recherche principalement en catalyse et en chimie des matériaux en vue de la mise au point de procédés de production. La technologie repose sur l'utilisation des outils de la chimie combinatoire pour accélérer la recherche de nouvelles conditions opératoires pour des réactions généralement connues, et notamment la recherche de nouveaux catalyseurs. L'expérimentation à haut débit permet de découvrir des systèmes catalytiques nouveaux et/ou des conditions opératoires performantes très rapidement.

Ces technologies font appel à de multiples disciplines comme la génomique, la protéomique, la robotique, les microsystèmes (déve-

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

loppement de systèmes miniaturisés, MEMS-*Micro-electro-mechanical-systems*), la microfluidique, la chimie, la bioinformatique...

Enjeux, Impact

Les enjeux de la maîtrise de ces technologies sont les suivants :

- il s'agit de rendre les domaines d'application (*drug discovery*, chimie, catalyse, matériaux...) plus compétitifs en diminuant les coûts associés et en augmentant la vitesse des découvertes (*time to market*) : il est évident que celui qui découvrira le plus rapidement et produira les principes actifs agrochimiques ou pharmaceutiques par le procédé le moins onéreux remportera le marché. L'enjeu est grand si l'on sait que les plus grands *block busters* pharmaceutiques rapportent chacun 5 ou 6 Md\$ par an ;
 - dans le domaine de la chimie, l'amélioration de procédés catalytiques est un domaine clé de la recherche chimique, étroitement lié à la propriété industrielle. D'après les *Chemical Abstracts*, les brevets les plus consultés dans le monde sont régulièrement des brevets de méthodologie de synthèse en catalyse. Ils se classent devant les brevets de chimie médicinale. L'importance des impacts du développement des procédés catalytiques est soulignée par le choix de la catalyse comme un des trois axes technologiques du pôle à vocation mondiale « chimie environnement Lyon Rhône-Alpes » (Axelera) ;
 - le développement d'industries connexes (fabrication de robots de criblage, de synthèse, logiciels...) contribue à pérenniser et développer ces secteurs industriels.
- L'horizon temporel prévisible de la maîtrise de certaines de ces technologies est assez proche (moins de 5 ans), notamment pour la santé (découverte de nouveaux traitements) et les biotechnologies. Pour la chimie, l'horizon est plus lointain : de 5 à 10 ans.

Marché

Les domaines d'application de ces technologies sont la pharmacie et l'agrochimie (découverte de nouveaux médicaments, herbicides, insecticides, fongicides...), les biotechnologies (mutagenèse dirigée, par exemple), la chimie (mise au point de procédés catalytiques et de matériaux innovants).

Le marché européen du criblage à haut débit (découverte de principes actifs) a été estimé à 377 M€ et devrait augmenter pour atteindre 722 M€ en 2010. Le marché du HTE est lui encore émergent, sa croissance est à prévoir dans les années à venir. Globalement, le marché de ces technologies est un marché à fort potentiel.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, sciences médicales et alimentation, physico-chimie de la pharmacologie, médecine et odontologie, chimie moléculaire, chimie analytique, informatique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, informatique, analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, chimie organique, biotechnologies.

■ Pôles de compétitivité : Innovations thérapeutiques (Alsace), Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : protéomique ; génomique fonctionnelle à grande échelle ; microtechnologies pour l'intensification des procédés ; transgénèse ; modélisation, simulation, calcul ; acquisition et traitement de données.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA (GCC : Groupe de chimie combinatoire et de criblage à haut-débit), CIT (Rennes, HTE), Institut Gilbert Laustriat (Criblage et chimiothèque nationale, Strasbourg), LOF Rhodia-CNRS (HTE), RMNT (Réseau Micro Nano Technologies).

Industriels : Cerep, Hybrigenics, Biométhodes (Massive Mutagenesis® - Demande PCT WO 02/16606 - technologie phare de Biométhodes, est la seule technologie de mutagenèse dirigée combinatoire à haut débit), Rhodia (HTE).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : HTS : Aclara Biosciences (États-Unis), Discovery Partners (États-Unis), Vertex Pharmaceuticals (États-Unis), Euroscreen (Belgique), Interbioscreen (Russie) ; HTE : DSM (Pays-Bas) et probablement les différentes grandes entreprises du même secteur comme Degussa (Allemagne), Avantium (Pays-Bas), Symyx (États-Unis)... Certains laboratoires du Massachusetts Institute of Technology à Boston.

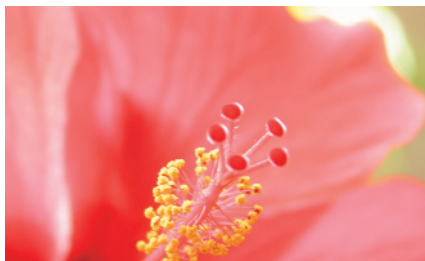
Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien ; chimie, caoutchouc, plastiques ; fabrication de composants électroniques ; recherche et développement.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



50. Vectorisation

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La vectorisation est une technologie qui permet d'améliorer l'efficacité d'un principe actif en augmentant sa biodisponibilité, par exemple en augmentant la fraction du principe actif captée par l'organisme sous sa forme pharmacologiquement active, non dégradée. Il s'agit plus précisément de promouvoir le passage à travers les membranes et/ou les cellules d'un principe actif, en le protégeant de la dégradation par les enzymes (enzymes du foie notamment). Les principaux domaines d'application sont la pharmacie (délivrance de médicaments), l'agriculture (délivrance de pesticides, engrais,...) et la cosmétique.

Dans le domaine de la santé, la mise en place de systèmes de délivrance moins contraignants pour les patients correspond aussi à une voie de recherche : l'insuline inhalée par exemple représente pour les patients diabétiques un réel progrès par rapport à l'injection. Les formes galéniques d'insuline « retard » qui réduisent le nombre d'injections nécessaires sont aussi issues de travaux de vectorisation de cette protéine.

Plusieurs types de techniques ont été développés :

- encapsulation du principe actif ;
- modification chimique du principe actif ;
- système d'administration (patch, spray, implantation d'appareils dans l'organisme pour libérer le principe actif directement sur la cible) ...

Ces techniques font appel à des disciplines variées : biotechnologies, chimie, microsystèmes et microfluidique, nanotechnologies, physico-chimie, thérapie génique...

Outre le coût de production (investissements lourds, de plusieurs dizaines de M) et la complexité de tels systèmes, des ver-

rous technologiques subsistent et ralentissent leur apparition sur le marché : difficulté à maîtriser les aspects toxicologiques, la biocompatibilité (des matériaux d'encapsulation, par exemple), la métabolisation du système, la biodégradabilité des matériaux utilisés.

Enjeux, Impact

Dans les années à venir, plusieurs opportunités susceptibles de contribuer au développement de la vectorisation vont se présenter :

- entre 2004 et 2008, de nombreux brevets de médicaments à forte rentabilité (*block busters*) vont tomber dans le domaine public : ceci devrait correspondre à une perte de 40 Md\$ pour leurs possesseurs. La vectorisation peut être une bonne opportunité pour contrecarrer ce phénomène. De nouveaux brevets revendiquant de nouvelles formes « vectorisées » de molécules tombant dans le domaine public pourront être déposés ;
- par ailleurs, le marché des protéines thérapeutiques est en pleine croissance (taux de 10,5 % par an entre 2003 et 2010) : ces « grosses » molécules traversent les membranes et pénètrent difficilement dans les cellules d'où un besoin de vectorisation ;
- enfin, l'amélioration du confort des patients, grâce à la mise en œuvre de systèmes moins contraignants pour des maladies telles que le diabète, est un point important étant donné le vieillissement de la population et le développement de cette maladie dans les pays développés (le nombre de patients diabétiques (type II) devrait doubler entre 2002 et 2022).

L'enjeu est de ne pas laisser échapper ces opportunités pour renforcer la compétitivité française de ce secteur.

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

Dans le domaine de l'agriculture, l'enjeu de la maîtrise de cette technologie est de diminuer la quantité de produits utilisés pour faciliter les cultures (insecticides, pesticides...) en les délivrant de manière plus efficace. La vectorisation appliquée à ce domaine s'inscrit dans le cadre du développement durable. L'horizon temporel prévisible de l'impact de cette technologie est de 5 ans.

Marché

Les marchés de la vectorisation sont la santé (nouveaux traitements contre le cancer et le diabète, mais aussi la mise au point de nouveaux systèmes de distribution de médicaments déjà existants), l'agriculture (herbicides et insecticides plus efficaces) et la cosmétique (la cosmétique a été la première industrie à produire des liposomes en grande quantité).

Le marché mondial de la vectorisation pour la santé a été estimé, pour 2009, à 67 Md\$. Étant donné les enjeux présentés dans le paragraphe précédent, il convient de noter qu'il s'agit d'un marché à très fort potentiel.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, sciences

médicales & alimentation, physico-chimie de la pharmacologie, médecine et odontologie, chimie physique, chimie analytique, chimie moléculaire.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, chimie organique, chimie macromoléculaire, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Cosmetic Valley (Interrégional), Lyonbiopôle (Rhône-Alpes), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : thérapie génique ; ingénierie des anticorps monoclonaux ; micro et nanocomposants.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CNRS, Généthron, Inra, Inserm.

Industriels : Centillion (filiale de Sanofi-Aventis), Chelatec, Debiopharm, Flamel Technologies, In-Cell-Art, L'Oréal, Nanovec, Nicox, Pharmavectys, Speregène, Virsol.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Altea Therapeutics (États-Unis), Alza (États-Unis), AP Pharma (États-Unis), Aradigm (États-Unis), Emisphere Technologies (États-Unis), Noven Pharmaceuticals (États-Unis), Transpharma Medical (Israël).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

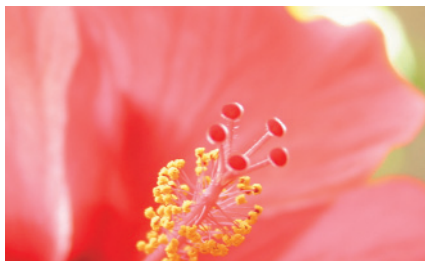
Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; industrie pharmaceutique ; fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien ; recherche et développement.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



51. Ingénierie des anticorps monoclonaux

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Un anticorps est une substance synthétisée par certaines de nos cellules (lymphocytes) en réponse à une stimulation par une substance étrangère à notre organisme. Un anticorps est monoclonal quand ses extrémités ne peuvent se fixer que sur un seul antigène (un antigène est une substance capable de déclencher une réponse immunitaire).

Produits par clonage d'une cellule spécialisée, les anticorps monoclonaux reconnaissent un antigène bien déterminé. Aujourd'hui, on a réussi, par exemple, à construire des anticorps monoclonaux spécifiques d'un gène surexprimé dans certains cancers du sein. Ces nouveaux médicaments ciblent précisément les cellules impliquées dans le mécanisme de développement de la tumeur et les détruisent. Les anticorps monoclonaux ont été au fil du temps perfectionnés. Après les anticorps monoclonaux d'origine animale, des anticorps monoclonaux humanisés puis humains ont vu le jour. Outre la mise au point d'anticorps le plus humanisés possible, l'effort à fournir aujourd'hui concerne l'utilisation de fragments d'anticorps.

La production des anticorps monoclonaux nécessite une augmentation importante des capacités de production utilisant les cellules de mammifères.

Enjeux, Impact

L'enjeu pour la France de la maîtrise de cette technologie est de contribuer au développement de nouveaux biomédicaments, pouvant devenir des *block busters* du fait des maladies visées (le spectre des maladies potentiellement traitées par des anticorps monoclonaux est très large et inclut notam-

ment les maladies des pays développés tels que les cancers).

L'horizon temporel prévisible de l'impact de la maîtrise de cette technologie est de 5 ans.

Marché

Les maladies susceptibles d'être soignées par ce type de traitement sont extrêmement nombreuses : les maladies infectieuses, les cancers, certains lymphomes, certaines leucémies, le rejet de greffe de rein, la maladie de Crohn, la polyarthrite rhumatoïde...

Du fait de leur capacité à reconnaître spécifiquement un motif moléculaire particulier, les anticorps monoclonaux sont des acteurs privilégiés dans la détection des molécules et le diagnostic. Ils sont utilisés dans de nombreux tests de dépistage comme, par exemple, les tests de type Elisa (*Enzyme Linked Immunosorbent Assay* ; c'est le type de test notamment utilisé pour le dépistage de la séropositivité au virus VIH) et ce, aussi bien dans le domaine médical que dans le domaine agroalimentaire.

Les anticorps monoclonaux représentaient environ 14 % du marché biopharmaceutique en 2002, contre 1 % en 1995. Les ventes mondiales des anticorps monoclonaux ont enregistré une croissance annuelle de 147 % entre 1995 et 2002. Plus de 113 anticorps monoclonaux sont actuellement en développement clinique dont 74 % sont en phase II et III. Entre 29 et 47 nouveaux anticorps monoclonaux devraient arriver sur le marché entre 2004 et 2009. Le marché mondial des anticorps monoclonaux a été estimé à 5,1 Md\$, en 2003.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

des organismes, sciences médicales et alimentation, physico-chimie de la pharmacologie, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire).

■ Liens avec (technologies) : contrôle des allergies alimentaires ; vectorisation.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, Inra, Institut Pasteur.

Industriels : Biocytex, Génopoeitic, Monoclo-

nal Antibodies Thérapeutics, Paris, Proteogénix.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Amgen (États-Unis), Genzyme (États-Unis), Johnson & Johnson (États-Unis), Novartis (Suisse), Roche (Suisse).

Commentaires

Il existe un fort décalage entre le haut niveau de connaissance académique français et le faible développement industriel dans ce domaine. Le transfert de technologie et plus précisément les problèmes de production de masse d'anticorps monoclonaux semblent expliquer ce phénomène.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

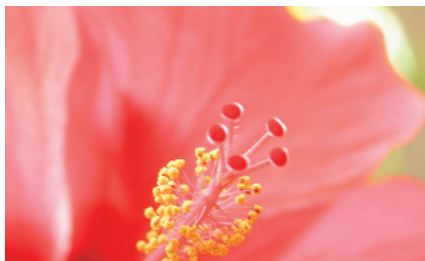
Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; recherche et développement.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



52. Vaccins recombinants

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les nouvelles générations de vaccins vivants sont fabriquées grâce aux techniques de recombinaison génétique telles que les techniques expérimentales d'assemblage de séquences d'ADN non contiguës à l'état naturel. Par rapport aux techniques traditionnelles de conception de vaccins, la conception de vaccins par génie génétique permet aux chercheurs de contrôler avec plus de précision les caractéristiques du vaccin. Il n'est plus nécessaire d'utiliser le virus entier, seul l'antigène (substance capable de déclencher une réponse immunitaire) est inséré. Les techniques mises au point grâce à la transgénèse permettent de créer des vaccins de plus en plus complexes, susceptibles d'immuniser le patient contre plusieurs antigènes simultanément.

Les vaccins recombinants se veulent plus sûrs et plus efficaces que les vaccins traditionnels. Bien que nécessitant des méthodes de production innovantes, les vaccins recombinants ne seraient pas plus coûteux que les vaccins classiques.

Le premier vaccin recombinant humain mis sur le marché a été celui de l'hépatite B. Le vaccin anticoqueluche a suivi.

L'un des verrous à l'utilisation de cette technologie est l'acceptation du public. Il s'agit de produits mis au point grâce à la transgénèse et le grand public n'est peut-être pas encore prêt à accepter les risques liés aux OGM. Par ailleurs, la mise au point d'un vaccin est extrêmement longue (entre 10 et 15 ans), ce qui peut dissuader les investisseurs de mettre les capitaux nécessaires au développement de tels produits.

Enjeux, Impact

Il existe encore de grandes maladies infec-

tieuses, comme le sida, la malaria et la tuberculose, pour lesquelles on ne dispose encore d'aucun vaccin efficace. L'enjeu de la maîtrise de cette technologie est donc de mettre au point des nouveaux traitements médicaux innovants et peu coûteux susceptibles d'enrayer ces épidémies ravageuses.

Certains vaccins sont déjà disponibles (hépatite B, anticoqueluche), mais des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires pour augmenter l'impact de cette technologie sur la santé publique. L'horizon temporel prévisible de l'impact de cette technologie est probablement de plus de 10 ans.

Marché

Le marché est principalement celui des maladies infectieuses : il est à l'échelle de la gravité des maladies qui restent sans vaccin efficace aujourd'hui : sida (40 millions de malades dans le monde), malaria (un million de morts par an en Afrique), tuberculose (huit millions de nouveaux malades chaque année)...

Parallèlement, le marché des cancers est également visé. Les premiers vaccins visant à stimuler le système immunitaire contre les tumeurs cancéreuses seront disponibles en 2006 aux États-Unis.

En 2002, les vaccins recombinants représentaient 4 % du marché biopharmaceutique. 87 traitements potentiels étaient en cours d'essais cliniques en 2002. 19 vaccins recombinants devraient être mis sur le marché entre 2004 et 2009 selon une hypothèse basse contre 32 selon une hypothèse haute.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie, biologie des populations et écologie.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques.

■ Pôles de compétitivité : Lyonbiopôle (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : protéomique ; transgène.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Institut Pasteur. Industriels : Sanofi-Pasteur, Biomérieux, Merial, Pierre Fabre, IDM, Transgène.

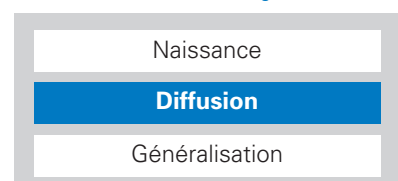
■ Exemples d'acteurs dans le monde :

Acambis (Royaume-Uni), Bavarian Nordic (Danemark), Glaxomithklime (Royaume-Uni), Medigene (Allemagne), Novaxax (États-Unis), Xenova (Royaume-Uni).

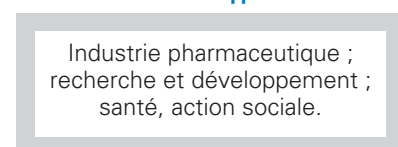
Commentaires

L'écosystème français est particulièrement riche avec les leaders mondiaux du domaine (Sanofi-Pasteur 23 % du marché mondial, Biomérieux, Merial). Le pôle de compétitivité Lyonbiopôle, projet mondial, qui vise à conforter le leadership mondial du territoire rhodanien dans les vaccins et le diagnostic, témoigne du potentiel scientifique, technique et industriel français sur le sujet.

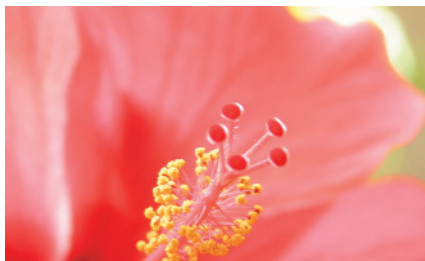
Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



53. Alimentation pour le bien-être et la santé

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

L'alimentation participe activement à la santé. Hippocrate l'affirmait déjà : « Que ton aliment soit ta première médecine. » Toutefois, la notion d'aliment santé (ou aliment fonctionnel) a émergé seulement récemment, accompagnant une rupture des habitudes alimentaires où l'argument santé devient un élément de choix des consommateurs. Au-delà de la satisfaction des stricts besoins nutritionnels, l'alimentation devient un moyen d'améliorer le bien-être, de maintenir un bon état de santé, voire de réduire le risque de certaines maladies.

Un aliment est dit fonctionnel si :

- il contient un constituant qui affecte une ou un nombre limité de fonctions dans l'organisme selon un mécanisme tel qu'il a un effet positif ;
- il a un effet physiologique ou psychologique qui va au-delà de l'effet nutritionnel traditionnel.

Les aliments pour la santé peuvent être classés en trois catégories : les aliments de l'équilibre et du bien-être (aliments nutritivement corrects, porteurs d'image santé), les aliments du rééquilibrage et du retour au bien-être (aliments de régime minceur, de régime tonique, de régime confort...) et les aliments de santé (aliments de prévention du risque).

Enjeux, Impact

Les enjeux pour la France de la maîtrise de cette technologie sont multiples :

- répondre à la demande des consommateurs qui accordent de plus en plus d'importance à la valeur santé de leur alimentation ;
- permettre de répondre aux besoins d'une partie de la population contrainte de suivre un régime alimentaire particulier (lutter contre l'obésité, par exemple. Il est, en effet,

urgent de prendre en compte ce problème de santé publique : selon l'Inserm, le nombre d'enfants obèses est passé de 5 à 13 % en 10 ans) ;

- mettre en place des stratégies efficaces de prévention des maladies typiques de nos sociétés industrialisées et accompagner le vieillissement des populations occidentales en leur assurant la meilleure qualité de vie possible pour réduire les dépenses de santé. La réglementation, qui doit veiller à la non-tromperie du consommateur, fait l'objet de nombreuses réflexions et est en pleine évolution. Elle devrait se stabiliser dans les années à venir. Cette amélioration passera par une concertation large entre les autorités administratives nationales (Afssa, Agence française pour la sécurité sanitaire des aliments) et internationales, les scientifiques, les industriels et les consommateurs.

Le développement de cette technologie représente pour l'industrie agroalimentaire un créneau d'innovation de première importance, lui ouvrant des marchés à haut potentiel de croissance. L'horizon temporel prévisible de l'impact de cette technologie est de 5 à 10 ans.

Marché

Le marché mondial de l'aliment santé représentait en 2004 un chiffre d'affaires compris entre 55 et 96 Md selon les définitions plus ou moins restrictives que l'on donne à ce terme, et devrait connaître une croissance annuelle de 20 % dans les dix prochaines années. D'ici à 2011, de 6 à 10 % du marché alimentaire total sera ainsi constitué d'aliments santé. Ce marché en pleine croissance est soutenu par une forte demande du consommateur. Selon une étude du Crédoc (Centre de recherche pour l'étude et l'obser-

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

vation des conditions de vie ; 1999), 77 % des Français sont prêts à payer au prix fort le produit qui apporte du bénéfice pour la santé.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Cancer-Bio-Santé

(Midi-Pyrénées, Limousin), Vitagora (Bourgogne), Prod'innov (Aquitaine), L'aliment de demain (Bretagne), Nutrition santé longévité (Nord-Pas-de-Calais).

■ Liens avec (technologies) : contrôle des allergies alimentaires ; traçabilité, transgénèse.

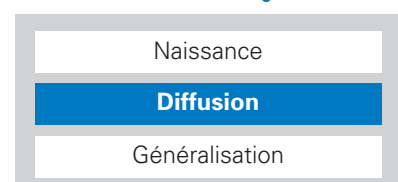
■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CNRS, Inra, Institut Pasteur.

Industriels : Danone, Valorex.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Kellogg's (États-Unis), General Mills (États-Unis).

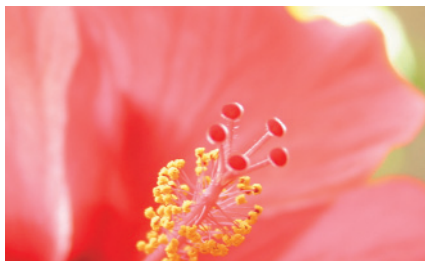
Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; santé, action sociale.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



54. Contrôle des allergies alimentaires

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Une augmentation significative du nombre de cas d'allergies alimentaires recensés a pu être constatée : entre 1982 et 1995, le nombre de formes sévères aurait été multiplié par un facteur 5. Prendre en compte les problèmes d'allergie alimentaire est un des objectifs fixés en 2001 dans le cadre du PNNS (Plan national nutrition-santé).

Il est important que les industriels, distributeurs et professionnels de la restauration collective se mobilisent pour maîtriser le risque allergène.

Les évolutions des habitudes alimentaires constituent vraisemblablement la principale cause du développement des allergies alimentaires. Les procédés de transformation et les interactions entre ingrédients et additifs sont également suspectés, même si leurs impacts sur l'allergénicité sont encore difficiles à évaluer.

Une recherche sur les mécanismes de l'allergie alimentaire est indispensable car une meilleure compréhension de la physiopathologie est source d'innovation pour l'élaboration de méthodes de prévention mais aussi de traitement.

Au niveau de la pratique médicale et de la surveillance épidémiologique, la recherche fondamentale est insuffisante et la formation médicale initiale reste faible. L'absence de système de surveillance épidémiologique constitue également un handicap pour l'amélioration du diagnostic et de la prise en charge du patient.

Enjeux, Impact

Le contrôle des allergies alimentaires est important pour quatre raisons principales :

- cette pathologie peut être grave et parfois mortelle ;

- la prévalence de la maladie a sensiblement augmenté depuis une décennie ;
 - la qualité de vie des malades et de leur entourage est influencée fortement et durablement ;
 - le coût économique, actuellement non chiffrable, devient une préoccupation.
- Face à ce problème de santé publique, l'industrie agroalimentaire doit :
- suivre et anticiper l'évolution de la réglementation concernant l'étiquetage des allergènes alimentaires ;
 - mettre en place des procédures HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Point*) et intégrer le danger allergène dans les guides de bonnes pratiques d'hygiène (GBPH) ;
 - saisir des opportunités de création ou de distribution de nouveaux produits antiallergiques.

Le cadre réglementaire européen est fixé par la nouvelle directive 2003/89/CE (modifiant la directive 2000/13/CE) qui concerne l'étiquetage et la présentation des denrées alimentaires, ainsi que la publicité faite à leur égard. La maîtrise de cette technologie aura un impact sur la qualité de vie des patients et sur la santé publique, avec un horizon temporel prévisible de 5 à 10 ans.

Marché

En France, on estime à 3,2 % la prévalence d'allergies alimentaires évolutives dans la population générale et à 8 % dans la population pédiatrique. Aujourd'hui, lorsqu'une personne souffre d'allergie alimentaire le seul traitement efficace est de suivre un régime d'éviction.

Le marché des produits « antiallergie » est aujourd'hui encore émergent (restauration collective réservée aux enfants souffrant d'allergies alimentaires...).

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie, biologie des populations et écologie.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : nutrition santé longévité (Nord-Pas-de-Calais).

■ Liens avec (technologies) : transgénèse ; traçabilité ; alimentation pour le bien-être et la santé ; ingénierie des anticorps monoclonaux ; technologies d'authentification.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Afssa (www.afssa.fr), CEA, CHU Nancy, Inra, Inserm.

Industriels : Nutrinov, Phylogène, Protéaxis, Valpiform.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Nestlé (Suisse), HIPP (Royaume-Uni), McCain (Canada).

Commentaires

Les technologies visant au contrôle des allergies alimentaires bénéficient de la présence sur le territoire français de plusieurs acteurs reconnus qui portent l'innovation du secteur. Le secteur académique français est particulièrement riche.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

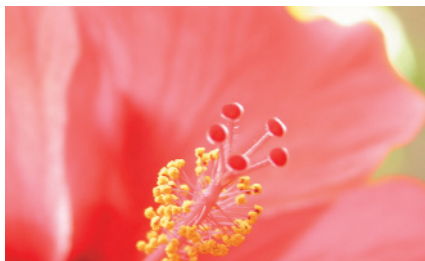
Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; santé, action sociale.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



55. Imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Les sciences du vivant sont porteuses de certains des plus forts potentiels de marchés industriels des années à venir. Notamment, les domaines de l'imagerie et de l'instrumentation couvrent l'essentiel de la progression attendue.

La présente fiche traite plus spécifiquement des technologies d'imagerie pour les sciences du vivant et la médecine et de l'instrumentation médicale.

Imagerie

Les techniques d'imagerie sont des outils d'analyse privilégiés dans les sciences du vivant et leur volet industriel (biotechnologies). Elles font appel à un grand nombre de technologies différentes, créant des images obtenues par des moyens physiques très variés. On distingue essentiellement deux processus utilisés : le spectre électromagnétique (visible, rayons X, microscope électronique, etc.) et l'acoustique (échographie). On distingue, entre autres :

- la microscopie optique. Utilisée dans toutes ses variantes, elle est un outil majeur de caractérisation : contraste de phase, microscopie interférentielle, microscopies confocales ;
- la microscopie électronique ;
- les techniques de tomographie (RMN, radiographie, ultrasons, traceurs radioactifs, PET) ;
- la radiographie ;
- l'imagerie infrarouge.

Les outils logiciels d'analyse d'image et d'assistance au diagnostic complètent la partie matérielle (comptage de cellules, séquençage d'ADN, etc.).

Instrumentation médicale

On classe également dans cette famille de technologies l'instrumentation associée aux sciences du vivant et à la médecine, notamment à la chirurgie assistée par ordinateur, à la chirurgie laser, à la chirurgie mini-invasive, au diagnostic (éventuellement réalisé à distance), à l'autodiagnostic, etc.

Ces technologies regroupent non seulement les matériels dédiés aux activités médicales et chirurgicales, les systèmes permettant d'établir par le patient lui-même un diagnostic fiable (par exemple, la mesure de la glycémie par les diabétiques), mais également les technologies logicielles permettant l'assistance aux actes chirurgicaux, l'archivage de données, ou encore les concepts d'organisation.

Si certaines techniques d'imagerie sont fonctionnellement au point, le passage de la chaîne d'imagerie d'un traitement humain à un traitement numérique ouvre de nouvelles voies de développement : méthodes de travail, analyse assistée par ordinateur...

Enjeux, Impact

Le domaine de l'instrumentation médicale recouvre un enjeu double pour la France. D'une part, l'évolution des techniques médicales et chirurgicales permet de meilleurs résultats dans le traitement des maladies, ou, dans le cas de la chirurgie mini-invasive, un traitement de la pathologie entraînant moins d'effets collatéraux (réduction des cicatrices, de la durée d'hospitalisation, etc.). D'autre part, l'instrumentation médicale représente un marché de première importance, en forte croissance du fait de l'augmentation de la demande des pays industrialisés et en passe de le devenir. Plus précisément, la maîtrise des technologies

Technologies du vivant – santé – agroalimentaire

permettant le diagnostic à distance, l'auto-diagnostic et la télémédecine est un enjeu majeur pour parvenir à maîtriser le coût de la santé dans nos sociétés où la population est vieillissante et la demande de soins a toutes les chances de croître.

Le maintien des équipes médicales et chirurgicales françaises à la pointe du développement des techniques thérapeutiques passe par des équipements au niveau de la prestation recherchée.

En ce qui concerne les technologies d'imagerie, l'enjeu majeur est de transformer une forte compétence de la recherche académique française dans le domaine en un potentiel industriel. Actuellement l'activité est essentiellement portée, en France, par des PME.

Promouvoir l'investissement sur ce type de technologies permet à la France de consolider sa position dans les domaines liés aux biotechnologies, qui sont une des clés de la croissance mondiale à moyen terme. L'impact de tels développements est donc direct en termes d'image et de compétitivité.

Marché

Le marché français de l'imagerie médicale in vivo représente une valeur d'environ 800 M€, pour un marché mondial de 20 Md€. Le marché de l'imagerie médicale est segmenté en trois grandes parties : l'endoscopie (invasif), pour 19 % ; l'imagerie classique (radiographie, échographie...), pour 59 % et les grands instruments (scanners X, IRM, PET), à hauteur de 22 %.

En parallèle, le marché français des instruments médicaux, hors imagerie, est de l'ordre de 4 Md€, pour un marché mondial de 100 Md€.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie, optique, informatique, traitement du signal, électronique, photonique,

optronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale,

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Innovations thérapeutiques (Alsace), Lyonbiopôle (Rhône-Alpes), Cancer Bio-Santé (Midi-Pyrénées, Limousin), Elop-sys (Limousin, Midi-Pyrénées), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; interfaces humain-machine ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; capteurs intelligents et traitement du signal ; micro et nanocomposants ; procédés et systèmes de photonique.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, Cermep, Cran, Erim, Hôpital Broussais, Hôpital Pitié-Salpêtrière, Inria, Inra, Inserm, Leriss (Paris XII), Leti, Lure, Sim, TTL...

Industriels : GE Medical Systems, Imagine Eyes, Imasonic, Imstar, Mauna Kea, Nanobiogène, Philips Medical, Sanofi-Aventis, Snitem (www.snitem.fr), Thales Angénieux...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Barco (Belgique), Braun Aesculap (Allemagne), Leica (Allemagne), Siemens (Allemagne), Zeiss (Allemagne), General Electric (États-Unis), Toshiba (Japon), Nikon (Japon), Olympus (Japon), Philips (Pays-Bas).

Commentaires

Sur ces technologies peu d'acteurs industriels français occupent des positions dominantes. Cependant, certains acteurs internationaux ont en France des sites de production ou de R&D. C'est le cas, par exemple, de General Electric ou de Philips. Cette situation est paradoxale quand on constate que la France possède une forte expertise académique dans les domaines connexes à ces technologies (Inria, Inserm, CEA, universités, etc.).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

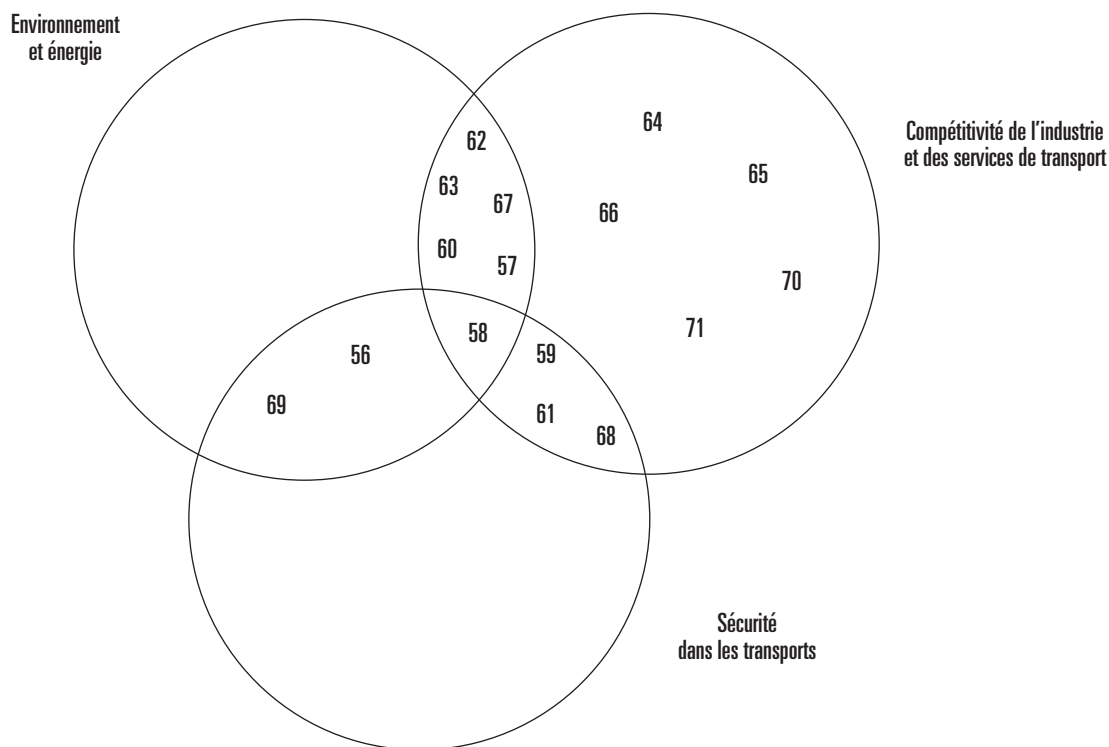
Industrie pharmaceutique ;
recherche et développement ;
santé, action sociale.



Transport

- 56 Architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre
- 57 Travaux d'infrastructures furtifs
- 58 Infrastructures routières intelligentes
- 59 Sécurité active des véhicules
- 60 Architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules
- 61 Sécurité passive des véhicules
- 62 Moteurs à pistons
- 63 Turbomachines
- 64 Acoustique des véhicules
- 65 Architecture électrique des véhicules
- 66 Architecture électronique des véhicules
- 67 Gestion de l'énergie à bord des véhicules
- 68 Liaisons de données véhicule infrastructure
- 69 Systèmes aériens automatisés
- 70 Positionnement et horodatage ultraprécis
- 71 Gestion des flux de véhicules

Des grands enjeux aux technologies clés



224

Le secteur des transports

Le contexte

La libéralisation des économies stimule le transport des marchandises, et le

développement de la production en flux tendus intègre fortement les services de transport (fret) dans les processus de production. Par ailleurs, les aspirations individuelles conduisent à davantage de déplacements des personnes. Répondant à ces besoins croissants, le domaine des transports connaît depuis plusieurs décennies un développement ininterrompu.

En 2001, l'industrie européenne (UE15) des équipements de transport produisait pour 161 Md€ de valeur ajoutée et employait 2,6 millions de personnes. L'Allemagne (67 Md€ de VA), le Royaume-Uni (28 Md) et la France (26 Md€) sont les pays leaders. Les exportations d'équipement de transport représentaient 18,8 % des exportations industrielles de l'UE et l'excédent com-

Les transports terrestres de marchandises sur le territoire métropolitain (source Oséo-Anvar)
(milliards de tonnes-kilomètres)

	1990	1995	2000	2001	2002
SNCF	49,7	46,6	55,4	50,4	50,0
Routes	193,9	227,1	266,5	273,7	277,2
Voies navigables	7,2	5,9	7,3	6,7	6,9
Oléoducs	20,5	22,3	21,7	21,2	20,7

Les transports intérieurs de voyageurs (source Oséo-Anvar)
(milliards de voyageurs-kilomètres)

	1990	1995	2000	2001	2002
Voitures particulières	585,6	640,1	699,1	727,6	733,5
Autobus et autocars hors RATP	39,1	39,6	40,4	38,7	37,6
SNCF	63,7	55,6	69,9	71,5	73,5
dont TGV	14,9	21,4	34,7	37,4	39,9
RATP	11,9	10,3	12,7	12,9	13,1
dont ferré	9,7	8,3	10,1	10,3	10,4
dont routier	2,2	2,0	2,6	2,6	2,7
Transports routiers	11,4	12,1	15,1	14,0	13,7

mercial de l'UE 25 dans ce secteur est de 57,5 Md€.

La France dispose historiquement d'une industrie des transports (conception et fabrication des véhicules) de tout premier plan, ainsi que d'opérateurs de services de transports d'envergure internationale.

Automobile

L'Union européenne (UE 25), l'Amérique et l'Asie se partagent, en parts à peu près égales, l'essentiel (98 %) de la production et du marché automobiles mondiaux. Le secteur automobile représente 3 % du PIB de l'Union européenne (UE 15), et 7,5 % de la valeur ajoutée des industries manufacturières. Dix millions de personnes travaillent directement ou indirectement pour l'industrie automobile, soit 7 % de l'emploi du secteur manufacturier européen. Il y a eu 15,9 millions de nouvelles immatriculations en Europe en 2003. Les exportations européennes représentent de l'ordre de 73 Md€ en 2002 et les importations près de 26 Md€.

Bien que les centres de décision restent dans les pays « historiques » des marques, les constructeurs européens ont déplacé une partie des usines d'assemblage en Europe de l'Est : Volkswagen produit la marque Skoda en République tchèque et la marque Audi en Hongrie, Fiat produit en Pologne, Renault en Roumanie... L'assemblage final reste pro-

che des marchés, surtout face à une diversité croissante des produits (les « options » dans l'automobile). En revanche les équipements amont, et a fortiori les composants standards, peuvent être fortement délocalisés. Par exemple, un équipementier dans le domaine du câblage sera amené à délocaliser en Tunisie les faisceaux standards et conservera en Europe les produits plus sophistiqués.

Les constructeurs français cumulent un chiffre d'affaires de 106 Md€ (2003), pour une production proche de 6 millions de véhicules (de l'ordre de 9 % de la production mondiale). Ce secteur représente 300 000 emplois directs en France et 760 000 emplois industriels indirects ; en ajoutant les emplois induits on arrive au chiffre de 2,5 millions d'emplois. L'automobile a représenté 15,3 % des exportations françaises en 2003 ; c'est la branche industrielle qui contribue le plus à la balance commerciale (12 Md€ environ). La R&D du secteur est de 7 Md€, représentant 5 % du chiffre d'affaires des constructeurs, 6 % de celui des équipementiers et de 9 % à 15 % du CA des équipementiers électroniques. Les acteurs clés en France sont :

- les constructeurs : PSA, Renault, Renault Trucks, Irisbus... ;
- les équipementiers : Valéo, Faurecia, Delphi, Siemens, Johnson Controls... ;
- les sociétés de R&D externalisée

(10 % de la R&D automobile).

Le transport routier rassemble, quant à lui, près d'un million d'entreprises (dont beaucoup de petites) dans l'UE 25 et 3,7 millions d'emplois (2001) dont près de 520 000 en France. Il a généré une valeur ajoutée de 120,2 Md€ dans l'UE 25 (2001) dont près de 19 Md€ en France. En France, l'emploi dans le transport routier (fret et passagers) a augmenté de 30 % entre 1990 et 2003 et sa contribution au PIB est restée stable, voire a accusé une légère décroissance, sur cette période.

Ferroviaire

La construction ferroviaire représente en France un chiffre d'affaires proche de 3 Md€ et 17 000 emplois directs (matériel roulant, rail, contrôle commande). 44 % de la production est exportée. L'Europe représente 50 % des débouchés des constructeurs de matériel ferroviaire. Les acteurs clés en France sont Alstom Transport (Île-de-France, Tarbes), Bombardier France (Nord-Pas-de-Calais), Siemens (bureau d'études, ex-Matra Transport) et la SNCF. Pour l'industrie française, les opportunités importantes sont les pays émergents (trains classiques, grande vitesse) et les axes ferroviaires transeuropéens.

Près d'un million de personnes travaillent dans le transport ferroviaire dans l'UE 25 (moitié moins que dans les années 1980), qui représente 197 000

kilomètres de voies ferrées dont 49 % électrifiées. Ces dernières années, le transport de marchandises par rail a diminué au profit de la route (la part du rail est passée de 15,3 % à 8 % entre 1980 et 2001). Le transport de voyageurs par rail a augmenté de 1,1 % par an en moyenne depuis 1990, ce en raison du développement des voies à grande vitesse. La France dispose du second réseau ferré (mesuré en km) derrière l'Allemagne, mais le premier pour les lignes à grande vitesse. C'est le pays où l'emploi lié au service ferroviaire est le plus important, l'accroissement de l'emploi dédié au transport de voyageurs compensant la baisse pour le transport de fret.

Il n'existe pas, dans le monde, de réseau ferroviaire performant à la fois sur le fret et le transport de voyageurs : aux États-Unis, le réseau est performant pour le fret ; l'Allemagne est plus dynamique que la France en matière de fret ferroviaire ; le réseau japonais est performant pour le transport de passagers. Le réseau français n'échappe pas à cette règle. Alors qu'aux États-Unis la vitesse du fret est (en moyenne) de 60 km/h, en France, elle n'est que de 20 km/h (5 km/h s'il y a des frontières à passer) : il faut quatre jours au fret pour traverser la France. L'obstacle n'est pas vraiment technique (il existe une capacité de voies suffisante, bien qu'elles ne soient pas toutes électrifiées), mais organisationnel.

Naval

Les chantiers navals classiques européens ne représentent plus que 6 % des commandes mondiales en 2003. La chute a été extrêmement importante, essentiellement au bénéfice des chantiers asiatiques. Il existe d'ailleurs encore une surcapacité globale en Europe.

Le chiffre d'affaires français du naval « classique » (hors plaisance) fluctue selon les années entre 1 et 2 Md€. Ce secteur exporte une part importante de sa production : environ 50 %, essentiellement vers les États-Unis et l'Italie. Ce secteur emploie 6 600 personnes (2003), dont 4 000 aux chantiers de l'Atlantique (Alstom). En France, on dénombre 15 grands chantiers navals. La réparation représente 2 000 emplois dans quatre à cinq chantiers, et les équipementiers 10 000 emplois. Par ailleurs, la direction des chantiers navals (DCN) représente 12 000 emplois dans le naval militaire.

Concernant la plaisance, domaine d'excellence français (n° 1 mondial en voile, n° 3 en moteur), le chiffre d'affaires français est de 1,2 Md€, en croissance forte et régulière depuis 5 ans. Ce secteur pèse 10 000 emplois, dans 60 entreprises.

Aéronautique et spatial

L'industrie aérospatiale emploie directement en Europe 415 000 personnes, pour la plupart hautement qualifiées, et a généré en 2003 un chiffre d'affaires de 74 Md€, et une valeur ajoutée de 30 Md€ (UE 25), soit 18 % de la valeur ajoutée totale du secteur des équipements de transport. Royaume-Uni, France et Allemagne concentrent 83 % de la valeur ajoutée européenne. Les dépenses de R&D représentent près de 14,5 % du chiffre d'affaires. EADS, leader mondial dans plusieurs de ses métiers, démontre la faisabilité d'une intégration industrielle à l'échelle européenne.

En France, le système du transport aérien génère de l'ordre de 400 000 emplois directs et induits. L'industrie aérospatiale représente près de 101 500 emplois directs, et environ deux fois plus d'emplois indirects et induits. Elle a

réalisé en 2003 un chiffre d'affaires non consolidé de 24,9 Md€. Les dépenses de R&D représentent 17,5 % du chiffre d'affaires, soit près de 4,4 Md€. Les nouvelles commandes enregistrées au cours de 2003 par l'industrie aérospatiale française se chiffrent quant à elles à 40 Md€. La France dispose en ce domaine de champions industriels et technologiques au tout premier rang mondial : partie française d'EADS (Airbus et Eurocopter notamment), Dassault, Thales, Safran (Snecma-Sagem), Ariespace, Onera... Les régions Île-de-France et Sud-Ouest (Midi-Pyrénées et Aquitaine) disposent d'atouts industriels, scientifiques et techniques structurants à l'échelle européenne.

Le transport aérien progresse à un rythme supérieur à 7 % par an depuis 1970 (en kilomètres-passagers), gagnant du terrain sur le train. Sa valeur ajoutée est de 25 Md€ par an, dont un tiers est réalisé par le Royaume-Uni. Le marché, qui a été progressivement déréglementé et privatisé, est encore relativement fragmenté : on observe peu de fusions transfrontalières (à l'exception notable d'Air France-KLM). En revanche, on assiste à une multiplication des alliances transfrontalières, qui ont un effet très structurant (rationalisation des activités, à la fois au niveau industriel et commercial). L'impact est également très positif sur l'utilisation de la flotte, ainsi que sur le développement de « hubs » (plates-formes aéroportuaires de correspondance utilisées comme nœuds de réseau).

Au plan mondial, le groupe Air France-KLM (constitué en mai 2004) est le premier transporteur aérien en termes de recettes et le troisième en termes de passagers-kilomètres transportés (PKT). Avec 48,7 millions de passagers et 126,8 milliards de PKT en 2004, Air France-KLM est le premier transporteur

européen, devant Lufthansa et British Airways. Avec 51,3 millions de passagers en 2004 (+ 6,3 % par rapport à 2003), Paris-CDG est le septième aéroport mondial et le deuxième aéroport européen (derrière Londres-Heathrow) avec un certain potentiel de développement de ses capacités. CDG, avec 526 000 atterrissages et décollages en 2004 est le premier aéroport européen en termes de mouvements. Le système aéroportuaire parisien (CDG et Orly) est le deuxième en Europe (avec 75 millions de passagers en 2004) derrière celui de Londres (Heathrow, Gatwick, Stansted, Luton et London-City). Pour le fret aérien, Paris-CDG, avec 1,64 million de tonnes de fret, est la deuxième plateforme aéroportuaire européenne derrière Frankfurt. Le trafic passager des aéroports français est voisin de 130 millions de passagers par an.

Dans le service de transport aérien, les dix dernières années ont vu l'apparition de compagnies à bas coût (*low cost*) pour lesquelles Internet joue un rôle central (9 billets sur 10 pour ces compagnies sont achetés en ligne). Les lignes ferroviaires à grande vitesse peuvent concurrencer, là où elles existent, les services aériens pour des distances inférieures à 1000 km. Le développement de l'intermodalité air-fer est un élément important de la politique des transports en Europe.

La R&D dans le domaine de l'aéronautique est extrêmement importante, majoritairement (en budget) sous forme de développement, bien que l'aéronautique soit à l'origine de ruptures technologiques qui ont diffusé dans d'autres secteurs industriels. Les synergies technologiques intersectorielles sont recherchées.

Les enjeux du secteur des transports

Les enjeux transversaux

Malgré des spécificités propres à chaque mode de transport (terrestre, maritime, aérien), la plupart des enjeux sont transversaux à ces différents modes. En résumé, il s'agit, dans un contexte apparemment durable de prix élevé du pétrole (supérieur à 50 \$ le baril) :

- de réduire drastiquement l'ensemble des externalités environnementales et sociétales (accidents, bruit, pollution locale, congestion de la circulation, consommation de surfaces cultivables, consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre) et/ou d'internaliser les coûts qui en découlent ;
- d'améliorer la qualité du service rendu (temps de parcours, ponctualité, conditions de transport, suivi et traçabilité,...) ;
- de rendre les systèmes de transports résistant aux actes de malveillance et de terrorisme ;
- d'optimiser les coûts.

La réponse à ces enjeux réside dans des innovations tant sur les véhicules et leurs sous-ensembles (ensemble propulsif notamment) que sur l'organisation globale des systèmes de transport. Ces innovations sont attendues sur le plan technique et en termes d'organisation.

Les enjeux spécifiques

Transport routier

Selon le point de vue adopté, les enjeux s'expriment différemment :

- pour l'industrie des véhicules, il s'agit de vendre toujours davantage de véhicules : multimotorisation (plus d'un véhicule par foyer) dans les pays occidentaux au marché saturé, véhicules plus haut de gamme ou à plus fortes marges

(4X4, monospaces...), conquête des marchés présentant un potentiel de croissance (Peco, Chine, Inde, Brésil...) ;

- sachant que le transport routier représente environ un quart des émissions de GES liées aux activités humaines, ces perspectives conduisent les experts à pousser un cri d'alarme : à moins de ruptures (improbables dans les prochaines années) dans les technologies et les usages des véhicules routiers, les externalités sur l'environnement (émissions de GES et de polluants) et sur les populations (accidents de la route, nuisances sonores) continueront de croître.

Ferroviaire « longue distance »

Le transport ferroviaire (passagers et fret) apparaît comme l'un des plus favorables en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Les principaux enjeux sont :

- réduction de la « signature » sonore ;
- intensification de l'utilisation des voies ferrées ;
- interopérabilité européenne (contrôle commande, alimentation électrique, écartement des voies,...) ;
- ouverture à la concurrence du fret ferroviaire, qui contribuera à la nécessaire amélioration du niveau de service (délais, suivi,...), au moins en France ;
- généralisation de la grande vitesse commerciale à 350 km/h.

Transports urbains et périurbains

Avec en moyenne 80 % de population urbaine dans les pays européens, l'enjeu majeur est l'amélioration de la qualité de vie dans les villes, sacrifiée depuis les années soixante dix au « tout-voiture ». Il s'agit de :

- prendre en compte l'évolution de la demande en termes de transports (personnes, marchandises), conséquence notamment du vieillissement de la population ;
- permettre la coexistence du transport de passagers et de marchandises (le

plus souvent, en ville, des colis de petite taille) ;

- décongestionner les axes de transport.

Naval

Contrairement aux navires « standards » (cargos, porte-conteneurs, pétroliers,...), les navires dits à haute valeur ajoutée sont toujours produits en France, qui sait fabriquer des navires à l'unité et dispose d'un tissu de fournisseurs et de sous-traitants adapté. Les enjeux pour la construction navale française (y compris la plaisance) sont :

- l'augmentation de la valeur ajoutée et l'innovation ;
- la prise en compte des aspects environnementaux : le « paquebot zéro rejet » devient une réalité, les mêmes normes pourraient être élargies aux bateaux plus petits (grande plaisance dans un premier temps) ;
- le recyclage des bateaux de plaisance (une réglementation européenne s'ébauche).

Aéronautique et espace

Les enjeux « transversaux » indiqués ci-dessus s'appliquent naturellement au transport aérien (la part de l'aviation dans les activités humaines générant des gaz à effet de serre dans le monde est estimée à 3 % mais le secteur du transport aérien est tendanciellement en forte croissance, de l'ordre de 5 % par an). Deux enjeux spécifiques apparaissent :

- l'optimisation de l'utilisation de l'espace aérien, qui passe par la modification profonde du contrôle aérien (organisation du ciel unique européen, procédures, trajectoires,...) ;
- le raccourcissement du temps nécessaire aux formalités administratives et de sécurité (en conservant les mêmes exigences de sécurité).

Dans le domaine spatial, l'accès autonome à l'espace reste un enjeu stratégique

pour l'Europe et pour la France en particulier. Le contexte international (notamment l'arrivée de systèmes de lancement russes sur le marché commercial du transport spatial) a conduit l'Europe à réorganiser le secteur autour d'un pôle industriel unifié dont l'objectif est de dégager des économies d'échelle. Pour assurer son avenir, le secteur du transport spatial européen doit conserver son haut niveau de fiabilité et continuer à maîtriser l'équilibre entre la rigueur financière et le maintien des compétences. Forte de l'exemple de nos concurrents américains, l'Europe doit consolider son projet à moyen et long termes pour fédérer les énergies et les moyens au travers de perspectives claires d'exploitation et de développement.

Les tendances d'évolution du secteur des transports

L'intermodalité et la fin du « tout-routier »

Une réflexion globale permet d'édicter quelques principes directeurs visant à faire baisser les impacts négatifs des transports, tout en satisfaisant les besoins d'échanges de biens et de mobilité des personnes :

- à prestation finale égale, diminuer le besoin de transport (exemple : le courrier électronique se substituant au courrier traditionnel, le télétravail ne nécessitant pas pour tous un déplacement quotidien,...) ;
- à demande de transport donnée, favoriser la massification des flux de deux manières :
 - avoir moins recours aux flux tendus dans le fret, donc diminuer les fréquences de livraison et stocker davantage (ce qui se fait naturellement pour les biens à faible valeur ajoutée tels que les

matières premières) ;

- massifier un ensemble de flux empruntant un même axe et un même vecteur à haut débit (grosse capacité x grande vitesse) selon le principe des « hubs » : le transport de faible ou moyenne capacité reste dans ce schéma réservé aux liaisons terminales (origine vers hub, hub vers destination). À côté de ces schémas, des opérateurs de transport exploitant des trajets directs sans passer par un hub peuvent occuper certains segments de marché : fret urgent, voyageurs pressés prêts à payer davantage...

Ces principes directeurs conduisent à encourager la fin du « tout-routier », en engageant une réflexion globale sur l'intermodalité, tant pour les transports longue distance que pour les transports urbains et périurbains.

Les transports longue distance

D'ores et déjà, un tiers des échanges commerciaux européens se font par voie maritime et les premiers projets d'autoroutes maritimes sont mis en œuvre. Dans l'Union européenne, la majorité de la population se trouve à moins de 200 km des côtes et ce tropisme se renforce. Le transport maritime (ou fluvial) est un mode très favorable en termes de consommation d'énergie, et son attractivité se renforcera avec l'augmentation du prix du pétrole.

Le transport ferroviaire ne pourra regagner des parts de marché que s'il sait s'adapter à la demande (lots de moindre volume) et surtout s'il adopte des innovations (technologiques, organisationnelles) permettant d'accroître son efficacité, et donc son attractivité, à travers :

- la limitation de l'impact des ruptures de charges liées au transbordement au départ et à l'arrivée du tronçon ferroviaire ;

- une bourse de sillons pour l'optimisation de l'utilisation des infrastructures ferroviaires ;

- l'usage complémentaire des voies traditionnelles : utilisation des lignes TGV de nuit pour acheminer le fret ferroviaire, voire construction de TGV mixtes fret-passagers (comme certains avions) ;

- à plus long terme, le changement de l'usage des gares pour en faire des stations de préassemblage, afin de limiter les ruptures de charges et d'éviter les transports routiers usine-gare.

Dans ce schéma, le transport routier, dont la flexibilité est le principal atout, est réservé aux liaisons terminales.

Les transports urbains

Afin de sortir les centres ville du « tout-voiture » et de décongestionner les accès aux grandes métropoles, l'amélioration des services de transports urbains ou périurbains collectifs ou semi-collectifs est un enjeu majeur. La demande de transport requiert un service porte-à-porte qui, pour les passagers en particulier, n'est pas toujours intégré de façon optimale entre les différents modes. Le développement de parkings à la périphérie des villes, permettant de stationner près d'une gare pour venir en ville par les transports en commun, va dans ce sens.

Il y a par ailleurs une demande croissante (notamment du fait du vieillissement de la population) pour des transports de proximité à faible flux, du transport point à point ; or il n'existe pas de véhicules de moins de neuf places dans les transports publics. On va vers un transport individuel public, des véhicules mis à la disposition des clients avec éventuellement une assistance au conducteur, limités à une zone géographique. De nouveaux acteurs vont probablement se positionner sur ce sec-

teur, même s'il existe encore une incertitude sur le modèle économique de ces services.

Deux secteurs connexes à prendre en compte

Le tourisme

Le métier des agences de voyage se transforme très rapidement, en particulier du fait de l'impact du commerce électronique (émergence des agences virtuelles en ligne), mais aussi du plafonnement des commissions accordées par les compagnies aériennes (95 % de leur chiffre d'affaires). L'intégration des offres de voyages va se poursuivre, notamment avec la croissance du *dynamic packaging* qui permet à l'internaute de composer à sa guise son voyage avec transport aérien, hébergement, location de voitures, etc.

L'attractivité du parc hôtelier français, et en particulier parisien, passe certainement par l'amélioration du rapport qualité-prix comparé à celui d'autres destinations touristiques européennes, a fortiori dans un contexte d'euro fort vis-à-vis du dollar US. Elle pourrait passer également en partie par la mise en œuvre de la « haute qualité environnementale ».

Les services associés aux transports

Une tendance lourde, déjà largement perceptible, est le développement des services associés aux transports, qu'il s'agisse d'informations sur le trafic, d'aide au voyage (hotels, points d'intérêt, commerces...), d'informations multimodales pour les voyageurs, de la possibilité de connaître quasiment en temps réel l'état d'avancement d'une livraison, etc. Des sociétés de logistique qui associent transports aérien, ferroviaire et routier (sur le modèle de FedEx) proposent, déjà, un service tout intégré. À plus long terme, certains experts pré-

disent l'essor de la location automobile, qui permettrait de répondre aux besoins changeants des ménages (une petite voiture quand on va travailler, une grosse pour partir en vacances avec toute la famille...). Le modèle économique associé reste toutefois à préciser. Notons, enfin, que la multiplication des organes électroniques conduit à une modification profonde des métiers liés à l'entretien des véhicules. Ces acteurs, souvent des entreprises artisanales, se trouveront rapidement confrontés à des problèmes de compétences et d'importants besoins en formation.

Les tendances technologiques du secteur

Face aux enjeux et pour répondre aux évolutions des usages, les tendances technologiques dessinent un « tronc commun » aux différents modes de transport, complété par des tendances plus spécifiques à chaque mode de transport. On n'anticipe pas de rupture technologique majeure à l'horizon 2010.

La motorisation et les combustibles

Pour les moteurs thermiques des véhicules (moteurs à pistons, turbomachines), l'utilisation de combustibles fossiles classiques restera prépondérante dans la prochaine décennie ; toutefois :

- les cycles thermodynamiques présentent un potentiel d'optimisation exploitable grâce notamment à l'utilisation de nouveaux matériaux, de nouvelles architectures (échangeurs...) ou à l'apport de systèmes avancés de régulation ;
- la combustion peut encore être améliorée ;
- la conversion de l'énergie jusqu'à présent perdue sous forme de chaleur est indispensable (énergie de freinage, per-

tes thermiques du moteurs...) ;

- les combustibles à base d'hydrocarbures seront complétés par des carburants de synthèse ou issus de la biomasse ;
- l'hybridation de la propulsion couplant un moteur thermique et un moteur électrique commence à être produite en série (Toyota, bientôt PSA), et cette technologie est amenée à se développer.

La pile à combustible ne peut être envisagée que comme une solution à long terme, nécessitant une réflexion sur le cycle énergétique global du combustible (hydrogène, hydrocarbure) « du puits à la roue » et les capacités d'approvisionnement à grande échelle des catalyseurs (platine aujourd'hui) et du combustible (hydrogène). Quoi qu'il en soit, la pile à combustible ne possède pas une densité énergétique suffisante pour assurer la motorisation principale des avions ; elle est en revanche envisageable pour les groupes auxiliaires de puissance, nécessaires pour l'alimentation en énergie des équipements de bord.

Les nouveaux matériaux et les architectures des véhicules

Outre l'amélioration des moteurs, l'allègement des véhicules contribue à une meilleure performance énergétique. L'incorporation de matériaux nouveaux (métalliques, plastiques, composites, ...) et l'agencement de ces matériaux dans des architectures innovantes de véhicules permettent cet allègement. Dans le ferroviaire, en particulier, des innovations semblent possibles sur le matériel roulant : tracteurs, wagons (la conception des wagons de fret a environ 50 ans), trains sécables (testés en Allemagne).

La réduction du bruit

La réduction du bruit sera quant à elle obtenue grâce à :

- la réduction passive : en travaillant sur la motorisation (vibrations, instabilités,...), la configuration des véhicules (« masquage » des sources de bruit comme le moteur, aérodynamique,...), et (pour les transports terrestres), l'interaction roue-route ou roue-rail ;
- la réduction active : en transmettant un bruit en opposition de phase au bruit qu'on n'aura pas pu réduire à la source (les deux bruits s'annulent, la résultante étant le silence).

L'électricité et l'électronique

L'allègement des véhicules passe également par une optimisation des réseaux d'énergie à bord : des actuateurs électriques remplacent les fonctions hydrauliques à bord des avions (et donc un réseau électrique, plus léger, remplace le réseau hydraulique) ; le multiplexage ou (à plus long terme) l'utilisation des courants porteurs permet de réduire la masse de câbles à bord des voitures ; la récupération de l'énergie de freinage, qui devrait se généraliser, nécessite une électronique de puissance adaptée.

Les fonctions électroniques représenteront une proportion croissante du prix d'un véhicule : aides à la navigation (tous véhicules), systèmes d'anticollision (aéronautique, diffusion en cours vers l'automobile), aide au contrôle des trajectoires (véhicules routiers : ABS, ESP, régulateurs de vitesse...). Il devient donc indispensable de doter les véhicules de véritables systèmes d'exploitation. L'objet du consortium Autosar (*Automotive Open System Architecture*) est de développer un standard adopté par ses membres.

D'autres innovations sont rendues possibles à court ou moyen terme par les progrès en matière de TIC : tarification à l'utilisation (*pay per use*), limitation automatique de vitesse (systèmes de bord

de route, radar, GPS,...), aides à la conduite élaborées, taxation des véhicules selon leur consommation de carburant...

Les infrastructures de transport

Sur le plan « mécanique », l'incorporation de déchets ou de matériaux recyclés dans les routes ou les ballasts de voies ferrées constitue une tendance lourde. En outre, les méthodes de construction ou de rénovation d'infrastructures évoluent vers une plus grande « furtivité », c'est-à-dire une moindre gêne pour les populations ou les usagers lors des travaux.

Par ailleurs, lorsqu'il est question de transports « intelligents », une partie de cette intelligence réside dans les infrastructures de transport :

- intégration de fonctions dans les routes, permettant d'informer les véhicules de difficultés (prévention des accidents) ou de congestions du trafic ;
- de nouvelles technologies de signalisation et de régulation des trains (nouveaux systèmes TVM et ERTMS niveaux 1-2-3) permettront de diminuer l'espacement de sécurité des trains, et donc d'augmenter la capacité du réseau ;
- améliorations de l'organisation, des procédures et des outils pour le contrôle aérien.

L'intermodalité peut également être renforcée par le recours à des calculateurs d'itinéraire multimodal, qui déterminent la combinaison optimale entre différents types de transports (y compris le vélo, la marche...).

L'Europe bénéficie d'un domaine d'excellence avec Galileo, qui permettra d'offrir des services de positionnement avec une précision de 1 m contre 10 m pour le GPS américain civil. La mise en œuvre opérationnelle de Galileo est prévue pour 2007-2008. Le service de posi-

tionnement sera sans doute gratuit lui aussi, mais d'autres services à plus haute valeur ajoutée seront payants.

La place de l'homme dans les systèmes de transport intelligents (ITS)

À l'horizon 2010, le rôle croissant dans les transports des TIC et des systèmes d'aide au pilotage ne devrait pas bouleverser profondément les systèmes de transports : tout au plus y aura-t-il à cet horizon quelques lignes de métro automatiques supplémentaires en service dans le monde (y compris des lignes anciennes qui auront été automatisées). Le schéma cible est-il, à terme, de sortir complètement l'opérateur du véhicule ? Les experts sont partagés sur cette question, même s'ils s'accordent sur l'automatisation sans cesse plus poussée des transports, qui, seule, permettra des gains significatifs en termes de réduction des accidents et de gestion des flux de véhicules.

La configuration « sans pilote » est déjà mise en œuvre avec succès dans le transport urbain guidé (métro « Météor », Val,...). Sur les lignes de métro « classiques », seul l'usage des automatismes permet de garantir un espacement de 90 secondes entre rames aux heures de pointe. La France possède une avance

par rapport aux autres pays européens dans ce domaine. La RATP s'est engagée dans un projet d'automatisation totale de la ligne 1 du métro sans interruption de trafic. Si elle y parvient, le marché de la rénovation des vieux métros des capitales étrangères s'ouvre à la France. Le transport ferroviaire longue distance semble quant à lui réticent à l'absence de conducteur à bord, plus pour des questions d'acceptabilité que techniques.

La conduite routière automatique fait aujourd'hui l'objet d'études au niveau de la recherche académique. Le déploiement à grande échelle de flottes de voitures ou de camions automatiques nécessite néanmoins de nombreuses études et des développements complémentaires, pour lesquels les constructeurs ne semblent pas tous motivés (le discours ambiant proclame plutôt que la conduite sur route procure du plaisir au conducteur). La contribution des infrastructures doit également être prise en compte et pensée au niveau européen par les pouvoirs publics, en particulier pour assurer la standardisation et l'interopérabilité. Le Japon s'est doté d'une véritable vision stratégique et technologique dans ce domaine, et d'un pilotage idoine de cette initiative au plus haut niveau.

Bien que l'essentiel des phases de vol soient automatisées, il semble difficile, dans le domaine du transport aérien civil, de sortir complètement à moyen terme l'opérateur humain de la « boucle ». La tendance est davantage à développer de nouveaux outils intelligents afin d'assister et de simplifier le travail des opérateurs et d'en automatiser certaines fonctions. L'avion sans pilote, techniquement possible, ne paraît pas socialement acceptable dans l'immédiat pour le transport de voyageurs.

Enfin, la technologie est à même d'apporter des solutions dans le transport des petites charges utiles. La question clé est en effet : est-il pertinent, notamment sur le plan énergétique, pour transporter une charge utile de quelques kilos au plus (lettre, colis, caméra, capteur...) de mobiliser un véhicule dimensionné pour transporter son conducteur (quelques dizaines de kilos), le véhicule pesant quelques centaines de kilos ? Des systèmes robotisés légers (de surface, ou aériens) transportant uniquement la charge utile pourraient être la réponse. Les transferts de technologie du militaire vers le civil ouvrent un vaste champ d'applications possibles des engins sans pilote.

Transport



56. Architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Composantes essentielles des systèmes de transport, les infrastructures de transport terrestre (transport routier, transport guidé) doivent s'adapter à de nombreuses exigences ou contraintes parfois contradictoires :

- durabilité des infrastructures, en conditions « normales » (trafic, météorologie) ou vis-à-vis de risques naturels (mouvements de terrain, risque sismique ou hydrologique) ;
- réduction des impacts environnementaux : bruit, pollution des eaux de ruissellement, déchets ;
- amélioration de la sécurité (routière en particulier), par une meilleure adhérence et/ou lisibilité de l'infrastructure ;
- réduction du coût global de possession des infrastructures (investissement + entretien). Cette technologie nécessite une approche pluridisciplinaire au niveau de :
 - l'architecture globale : il incombe au maître d'œuvre, au moment de la conception puis de la réalisation de l'infrastructure, d'assembler et d'intégrer les différents matériaux et techniques à sa disposition pour répondre aux besoins exprimés et aux contraintes (trafic, conditions climatiques, adhérence, lisibilité, intégration dans le paysage ou la ville...) ;
 - des matériaux :

– selon la finalité de l'infrastructure et son environnement géotechnique, un vaste choix de matériaux est possible pour chaque partie de l'infrastructure. Une route, par exemple, comporte typiquement, à partir du sol terrassé, quatre couches qui doivent posséder des caractéristiques différentes : couches de forme, de fondation, de base, de roulement. La couche de roulement, en particulier, doit procurer au véhicule et au conducteur les caractéristiques voulues d'adhérence (longitudinale et latérale) et de

lisibilité (y compris en conditions météorologiques dégradées). Dans le cas d'un ouvrage d'art (pont, tunnel), la complexité est considérablement augmentée ;

– les matériaux sont typiquement : matériaux granulaires, matériaux poreux, bétons, bétons bitumineux, enrobés, liants, renforts métalliques ou fibreux, signalisation horizontale (peintures routières...). La maîtrise de la formulation et l'élaboration (malaxage...) de ces matériaux est également indispensable pour garantir les propriétés voulues avec une bonne reproductibilité ;

• l'anticipation : le suivi et la gestion de l'endommagement s'appuient sur une connaissance fine des mécanismes d'endommagement permettant de guider la conception en amont, des outils de diagnostic, la formulation et la mise en œuvre de matériaux de réparation des fissures, des méthodes de gestion de l'infrastructure (et les systèmes d'information associés).

Enfin, ces technologies doivent prendre en compte le rôle grandissant des technologies d'infrastructures routières intelligentes. Cette tendance devrait notamment conduire à inclure un nombre grandissant de capteurs ou de composants électroniques dans ou sur la chaussée.

Enjeux, Impact

Les innovations technologiques répondent à un enjeu économique : le seul réseau routier national français représente un patrimoine estimé à plus de 183 Md€. La compétitivité à l'export des 1 500 entreprises françaises du secteur est également en jeu. Par ailleurs les impacts des infrastructures sur la compétitivité des territoires sont reconnus.

Impliquer davantage la dimension « infrastructures » dans la réflexion peut égale-

ment contribuer significativement à combattre l'insécurité routière.

Enfin, l'impact environnemental ne doit pas être négligé, en prenant en compte :

- la valorisation de certains déchets par incorporation dans l'infrastructure (mâche-fers, résidus de pneumatiques...) ;
- la meilleure intégration dans l'environnement (nuisances sonores, visuelles, eaux de ruissellement).

Marché

En 2003, le marché des travaux publics consacrés aux transports terrestres a atteint près de 20 Md€ en France (près de 163 000 salariés), dont plus de la moitié pour des travaux routiers. Plus de la moitié de l'activité (en valeur) est consacrée à des travaux neufs, le reste correspondant à des travaux d'amélioration et d'entretien. Deux types de marchés sont concernés par cette technologie : les transports terrestres « longue distance » (entre métropoles), et les transports urbains.

En Europe, les réseaux sont globalement denses, et le marché sera tiré par la réalisation de lignes ferrées à grande vitesse, et la construction ou la rénovation de routes et d'autoroutes. Quelques ouvrages d'art de grande envergure sont également attendus (avec la liaison ferroviaire Lyon - Turin). En revanche, le développement de pays émergents (Pérou, Chine, Inde, Brésil...) entraîne l'explosion des besoins d'infrastructures (ex : ligne ferroviaire à haute vitesse Pékin - Shanghai).

La croissance de la demande de transports dans les zones urbaines exige d'importants travaux (élargissement, voies dédiées ...) ou la création de nouvelles infrastructures de transports en commun. La densité et la sensibilité des sols et des sous-sols, l'existence de multiples réseaux (eau, assainissement, énergies, communications...) rendent indispensable une approche spécifiquement urbaine et des compétences spécifiques.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, matériaux, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), mécanique, génie des matériaux, génie civil, géographie et aménagement.

■ Compétences technologiques : matériaux - métallurgie, procédés techniques, environnement-pollution, transports, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Vestapolis (Île-de-France), Génie civil ouest (Pays de la Loire), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), Ville et mobilité (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : textiles techniques et fonctionnels ; travaux d'infrastructures furtifs ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; sécurité passive des véhicules ; acoustique des véhicules ; modélisation, simulation, calcul.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : ENTPE, Inrets, LCPC, Réseau scientifique et technique de l'équipement (CETEs, LRPCs), RFF.

Industriels : Amec Spie Rail, Appia, Colas, Eiffage, Eurovia, Freyssinet, GTM.

Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre de grands programmes de recherche incitative Predit [Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - (www.predit.prd.fr)] et RGCU [Réseau de recherche technologique génie civil et urbain (www.rgcu.prd.fr)].

Pour en savoir plus : www.piarc.org ; www.fehrl.org ; www.equipement.gouv.fr ; www.usirf.com ; www.lcpc.fr ; www.fntp.fr

Commentaires

Il existe une véritable « école française des routes », qui permet à la France d'avoir quelques « champions » nationaux, facteurs clés de succès dans la compétition internationale.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Travaux publics, services de transports

Transport



57. Travaux d'infrastructures furtifs

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Dans l'état de l'art actuel (2005), la construction d'une infrastructure de transport (routier, ferroviaire) nécessite souvent plusieurs années de travaux. La gêne occasionnée par les travaux est généralement élevée, d'autant plus s'il s'agit de compléter une infrastructure existante (tramway, élargissement d'une autoroute). Les technologies pour des travaux d'infrastructures de transport plus « furtifs », c'est-à-dire engendrant le moins de gêne et d'interruption de service possibles, peuvent se décliner de la manière suivante :

- planification et ordonnancement des différents acteurs devant intervenir sur un chantier afin d'éviter, dans la mesure du possible, les « temps morts » ;
- préparation et traitement des sols (stabilisation, étanchéité...) ;
- choix des matériaux présentant à la fois les caractéristiques voulues et une bonne facilité de mise en œuvre ;
- utilisation de robots autonomes ou téléopérés (tunneliers, engins de terrassement...) ;
- utilisation des TIC (gestion du chantier) et des technologies de positionnement.

Pour le cas particulier des transports urbains, la réduction des nuisances et de l'encombrement en surface (installations, circulation d'engins, interruption des voies de circulation, poussière, bruit...) sont, plus qu'ailleurs, des critères importants. Les principales évolutions techniques concernent la réalisation de parois moulées en continu sans encombrement en surface (les machines sont sous terre), la mise en œuvre de méthodes d'excavation en continu (rabet de mine, chaîne à pics, haveuse...), de stabilisation du front de taille et de marinage (évacuation des déblais).

Ces technologies, qui comportent de nombreuses dimensions organisationnelles, trouvent également un vaste champ d'application dans la construction ou la remise à niveau des infrastructures ferrées. Ainsi, la RATP a engagé l'automatisation de la ligne 1 du métro parisien sans interruption de trafic (mise en service : 2010).

Enjeux, Impact

Permettre à la France de se doter ou de renouveler ses infrastructures de transport, sans perturber localement l'économie ni mécontenter les riverains, est un élément d'attractivité du territoire.

En outre, la France dispose d'entreprises de travaux publics et d'ingénierie que la maîtrise de ces technologies mettrait en situation favorable dans les appels d'offre internationaux.

Marché

Toutes les activités qui composent les travaux publics sont potentiellement concernées, notamment :

- les travaux souterrains et les travaux routiers ;
- les voies ferrées ;
- l'adduction d'eau, l'assainissement et les autres canalisations ;
- les travaux électriques.

Selon la Fédération nationale des travaux publics (www.fnfp.fr), le secteur représente, en France, 8 000 entreprises, 260 000 salariés et un chiffre d'affaires de 32 Md€ en France et 15 Md€ à l'exportation.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), génie des procédés, mécani-

que, génie des matériaux, génie civil, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, psychologie, sociologie, géographie et aménagement.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, analyse, mesure et contrôle, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail matériaux, environnement - pollution, machines outils, transports, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Génie civil ouest (Pays de la Loire), Ville et mobilité (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : ingénierie des systèmes complexes ; positionnement et horodatage ultraprécis ; modélisation, simulation, calcul ; architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre ; infra-

structures routières intelligentes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CGES (ENSM Paris), ENPC, Inrets, LCPC.

Industriels : Colas, Egis, Eiffage, RATP, Soldata, Solétanche Bachy, Vinci...

Commentaires

Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre de grands programmes de recherche incitative tels que le Predit [Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (www.predit.prd.fr)] et le RGPU [Réseau de recherche technologique génie civil et urbain (www.rgpu.prd.fr)].

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Travaux publics ; industries des équipements mécaniques ; industries des équipements électriques et électroniques ; industries extractives ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques ; services aux entreprises.

Transport



58. Infrastructures routières intelligentes

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Dès à présent, la télématique routière équipe un nombre croissant de grands axes (autoroutes, abords des grandes agglomérations...). Elle apporte une information aux conducteurs et aux opérateurs sur les conditions de circulation (bouchons, météo, événements...). Dans les prochaines années, cette tendance à équiper les routes d'équipements « intelligents » se poursuivra. Les fonctionnalités suivantes sont notamment attendues :

- information des conducteurs. De nombreux accidents sont dus à un comportement des conducteurs inadapté aux difficultés de la route. Les infrastructures routières intelligentes seront équipées de systèmes d'information (capteurs, chaînes de traitement, panneaux à messages variables...) signalant aux conducteurs l'imminence d'une difficulté : rupture physique de l'itinéraire (dévers inattendu, nid-de-poule...), conditions dégradées (eau sur la chaussée, vent...), mauvaise visibilité ou lisibilité de la route (brouillard, éblouissement, contraste...) ;
- guidage des véhicules. Cette fonctionnalité est un premier pas vers la conduite automatisée, qui nécessite un guidage latéral (garder le véhicule sur la chaussée) et longitudinal (adapter la vitesse aux conditions d'adhérence et de trafic). À titre d'illustration, des ferrites équipent déjà certaines routes de montagne, permettant aux chasse-neige équipés de suivre le tracé de la route, même quand elle est recouverte de neige. Dans un autre cas, des peintures spéciales sont appliquées sur la chaussée, représentant un code à barre, et sont lues par un capteur installé à bord du véhicule. Ce code peut contenir diverses informations, comme la vitesse recommandée.

À terme, les informations générées par les dispositifs décrits ci-dessus peuvent être intégrées dans une boucle de contrôle-commande qui intervient sur les aides à la conduite (ESP, freinage...), voire sur le pilotage global du véhicule. Ces dispositifs peuvent également être couplés avec des systèmes de positionnement satellitaires (*Positionnement et horodatage ultraprécis*). Il apparaît clairement que cette technologie est complémentaire de la *Sécurité active des véhicules*. Dans un premier temps, les deux technologies peuvent se développer parallèlement, les informations ou les aides à la conduite générées par l'infrastructure étant interprétées par le conducteur. À terme, une coopération entre le véhicule et l'infrastructure est incontournable, d'où des problématiques de standardisation des interfaces associées.

Le principal verrou est le coût du déploiement à grande échelle de tels dispositifs sur l'ensemble du réseau routier : la France compte, en effet, près d'un million de km de routes secondaires, les plus accidentogènes, qu'il conviendrait d'équiper en priorité.

Enjeux, Impact

On estime à un million par an le nombre de morts dans les transports dans le monde (5 000 en France), principalement dans les transports routiers (y compris les piétons). Les blessés se comptent en millions. Les infrastructures routières intelligentes permettent de répondre à cet enjeu de société majeur.

L'impact pour l'économie française de ces technologies est double :

- réduction de l'insécurité routière, en France et en Europe dans un premier temps ;
- renforcement de la compétitivité des

industriels maîtrisant ces technologies, les mettant en position de conquérir des marchés à l'export (tout d'abord dans les pays développés).

Marché

Les applications des systèmes de transports intelligents sont nombreuses, à la fois pour le transport des personnes et des marchandises. Parmi les applications possibles, on distingue :

- l'information des voyageurs ;
- la gestion de la circulation ;
- la gestion du transport de marchandises et des flottes commerciales ;
- la gestion des transports publics ;
- la sécurité dans les transports ;
- la gestion des situations d'urgence.

Le marché est en très forte croissance. On estime, par exemple, qu'aux États-Unis le marché devrait passer de 6 Md\$, en 2002, à 36 Md\$, en 2010.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : optique, génie civil, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, psychologie, sociologie, droit et sciences politiques, économie et gestion, géographie et aménagement.

■ Compétences technologiques : télécommunications, informatique, optique, analyse, mesure et contrôle, transports, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Génie civil ouest (Pays de la Loire), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Ville et mobilité (Île-de-France), Logistique Seine Normandie (Haute-Normandie), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes). Cette technologie clé, qui fait appel à de nombreuses briques technologiques, présente de ce fait un potentiel d'interaction avec de nombreux pôles de compétitivité (11).

■ Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour infrastructures de transport

terrestre ; travaux d'infrastructures furtifs ; sécurité active des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; capteurs intelligents et traitement du signal ; assemblage multimatériaux ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Les principaux acteurs français du secteur sont regroupés au sein de l'association ITS France (www.itsfrance.net). Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit [Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres-www.predit.prd.fr].

Parmi les acteurs dans le domaine des infrastructures, on peut citer :

Centres de compétences : Certu, Cetes (Lyon et Méditerranée), Inrets, LCPC, Setra. Industriels : sociétés d'autoroutes (APRR, ASF, Cofiroute, Sanef), Amec Spie, Ceryx Trafic System, Citilog, Colas, C-S Systèmes d'information, DTnalogic, Eurovia, Ifotec, Keolis, Lacroix (Groupe), Lumiplan, Neavia, RATP, Safran, SES Signalisation, Setec ITS, Soridis, Sterai, Thales, Traficon France...

Le Ser (Syndicat des équipements de la route - www.ser-info.com) rassemble des entreprises actives dans le domaine des infrastructures routières intelligentes.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : au niveau continental, trois organisations se chargent de la promotion des systèmes (dont les infrastructures) de transports intelligents : Ertico (*Intelligent Transport Systems & Services*) en Europe (www.ertico.com et www.itsnetwork.org) ; ITS America aux États-Unis ; ITS Japan au Japon.

Commentaires

La généralisation des infrastructures routières intelligentes ne fait de sens que si elle est « pilotée » au niveau européen, en particulier pour assurer la standardisation et l'interopérabilité. On notera que le Japon s'est doté d'une véritable vision stratégique et technologique dans ce domaine et d'un pilotage de cette initiative au plus haut niveau de l'État.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, travaux publics, services de transports, postes et télécommunications.

Transport



59. Sécurité active des véhicules

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La sécurité active englobe l'ensemble des dispositifs permettant de prévenir les accidents (chocs, perte d'adhérence, décrochage...) par une action préventive (information du pilote-conducteur) et/ou dynamique (le dispositif « prend la main » dans le pilotage du véhicule). Schématiquement, ces dispositifs incluent un ensemble de capteurs (rotation des roues, glissement, accélération, proximité d'autres véhicules ou d'obstacles...), une chaîne de traitement des signaux émis par ces capteurs (circuit électronique, Asic, ordinateur de bord...), et un actionneur qui se substitue plus ou moins au pilote en prenant des actions correctives ou en générant une alerte (accélération, relâchement du freinage, braquage de roues ou de gouvernes...).

À titre d'illustration, les systèmes ABS (anti-blocage des freins), BAS (assistance au freinage), ESP (correction de trajectoire) et anti-patinage, équipent de plus en plus souvent les véhicules routiers en série. Les avions commerciaux sont équipés de nombreux dispositifs qui assistent le pilote : GPWS (avertisseur de proximité du sol), anticollision TCAS (*Traffic Alert & Collision Avoidance System*), nouveaux concepts de pilotage en trajectoire...

Pour les véhicules routiers, de nouveaux dispositifs sont attendus, capables d'assurer des fonctions telles que prévenir les sorties de voies, éviter les chocs sur obstacles fixes ou mobiles, gérer les interdistances entre véhicules, limiter la vitesse du véhicule à la vitesse autorisée... À plus long terme, en associant ces technologies aux infrastructures routières intelligentes et au positionnement et horodatage ultraprécis, les aides à la conduite changeront profondément le rôle du conducteur.

Concernant les aéronefs, le niveau d'automatisation est déjà tel qu'on peut envisager des vols 100 % automatiques.

Si les progrès en matière d'électronique ouvrent un vaste champ pour le développement de nouveaux dispositifs, plusieurs verrous limitent la diffusion de ces technologies, principalement dans le segment automobile :

- l'augmentation du coût d'achat que les consommateurs ne sont pas tous prêts à supporter ;
- les problèmes de fiabilité (résolus dans l'aéronautique, moyennant des procédures formelles de développement et de certification) ;
- l'évolution du rôle du conducteur, notamment le conducteur non professionnel (automobile), et non formé à ces nouveaux dispositifs.

Enjeux, Impact

On estime à un million par an le nombre de morts dans les transports dans le monde (5 000 en France), principalement dans les transports routiers (y compris les piétons). Les blessés se comptent en millions. Les technologies de sécurité active des véhicules permettent de répondre à cet enjeu de société majeur.

L'impact de ces technologies est double :

- réduction du nombre de morts et de blessés dans les transports ;
- renforcement de la compétitivité des industriels maîtrisant ces technologies (potentiel export).

Marché

Les marchés concernés couvrent tous les modes de transports. Le secteur aéronautique est déjà largement utilisateur de technologies de sécurité active.

Ces technologies sont en fort développement dans le domaine automobile. Sur ce secteur, le marché pourrait ainsi passer de 2,7 Md€ en 2003 à 3,6 Md€ en 2010, en Europe. À cette même date, le marché de la sécurité active dans l'automobile pourrait représenter 4,54 Md\$ en Amérique du Nord. En fonction des technologies, les taux de pénétration sont très différents. Ainsi, l'ABS devrait équiper pratiquement 100 % des nouveaux véhicules dès 2006, alors que les systèmes d'aides à la conduite avancés restent destinés à des segments haut de gamme et continuent de connaître des développements technologiques.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : optique, mécanique, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, psychologie.

■ Compétences technologiques : composants électriques, audiovisuel, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : Vestapolis (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), System@tic (Île-de-France), Photonique (Provence-Alpes-Côte-d'Azur), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Mobilité

et transports avancés (Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité passive des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; capteurs intelligents et traitement du signal ; ingénierie des systèmes complexes

■ Principaux acteurs français

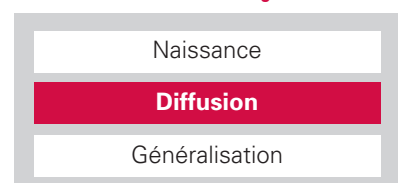
Dans les domaines automobile et ferroviaire, les travaux de recherche en matière de sécurité (dont sécurité active) sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres-www.predit.prd.fr).

Centres de compétences : CEA, CNRS IRC-CyN (Nantes), CNRS LAAS (Toulouse), Inria, Inrets, Onera...

Industriels: Alstom, EADS-Airbus, Faurecia, PSA Peugeot Citroën, Renault, Safran, Thales, Valéo...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs et équipementiers automobiles travaillent sur la sécurité active des véhicules. Les constructeurs et équipementiers de l'aéronautique et du ferroviaire sont également concernés.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Transport



60. Architecture et matériaux pour l'allégement des véhicules

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

L'allégement des véhicules est une composante essentielle de l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de transport, avec l'optimisation des moteurs, des trajectoires et des flux de véhicules.

Cet allégement sera obtenu en adoptant une approche structurée selon trois axes principaux :

- nouveaux matériaux : l'aluminium, les alliages d'aluminium ou de magnésium, le titane, les matériaux composites et autres polymères représentent des matériaux de choix du point de vue de l'allégement. En réaction, les aciers ont connu des avancées importantes. Celles-ci concernent d'une part leur utilisation sous forme de mousses ou de matériaux sandwich, et d'autre part la mise au point de nouvelles nuances à très haute résistance ;
- méthodes de conception innovantes : les outils de CAO et de simulation permettent de dimensionner les structures au plus juste, sans engager de coûts rédhibitoires. Ces techniques permettent notamment de diminuer les épaisseurs de matériaux aux endroits les moins critiques ;
- assemblage des matériaux : le collage ou le soudage par friction permettent des gains de masse par rapport aux techniques conventionnelles d'assemblage ;
- à plus long terme, des architectures de véhicules différentes de celles qui nous sont familières aujourd'hui peuvent être envisagées.

L'industrie aéronautique poursuit de façon continue ses efforts d'allégement des aéronefs depuis plusieurs décennies. Les avions de ligne de nouvelle génération intègrent massivement les composites (50 % des pièces de structure sur le Boeing 787 et l'Airbus

A350, qui seront mis en service respectivement en 2009 et 2010). L'allégement est un point critique dans l'aéronautique, en particulier pour les gros porteurs. Tous les postes sont concernés : pièces de structures, turbomachines, équipements (sièges...), câblage. Dans ce secteur, les nouvelles architectures (configuration « canard », ailes volantes...) ne devraient apparaître, au mieux, que dans 20 ans, si le coût élevé du carburant continue d'exercer une pression sur les compagnies aériennes et les constructeurs.

Ces dernières années, les automobiles ont vu leur poids augmenter sous l'effet de l'intégration d'équipements électroniques ou de sécurité, alors que dans le même temps les efforts pour l'allégement des structures se sont relâchés en raison du faible prix du pétrole. Avec son renchérissement et la prise en compte grandissante de l'impact des gaz à effet de serre, l'allégement redevient un des enjeux du secteur. Comme pour l'aéronautique, tous les postes sont concernés : structure, carrosserie, moteur, équipements intérieurs, câblage...

Dans le domaine du ferroviaire, l'allégement des véhicules n'a pas été prioritaire ces dernières années (la conception des wagons de fret date de plus de 50 ans).

L'allégement des véhicules impose non seulement des modifications sur les architectures et les matériaux utilisés mais également sur leurs procédés de mise en œuvre. Cet aspect est important dans le domaine automobile où les procédés doivent permettre de gagner en productivité. Les aciers plus résistants sont moins facilement formables ; les plastiques ou les composites ne se prêtent pas toujours aux procédés de peinture sur la chaîne de production.

Enjeux, Impact

Les enjeux essentiels qui poussent à l'allègement des véhicules sont la maîtrise des consommations énergétiques et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En France, les transports représentaient 27 % des émissions de gaz carbonique (CO₂) en 2002.

Face à l'enjeu que représente la réduction des émissions de gaz à effet de serre (notamment le CO₂), et dans le cadre des objectifs fixés par le protocole de Kyoto, la Commission européenne et les constructeurs automobiles présents sur le marché européen, par le biais de leurs associations respectives (Acea, Jama, Kama), ont conclu un accord volontaire : celui-ci prévoit des émissions de 140 g de CO₂/km en 2008, et une limite à 120 g/km à plus long terme. L'allègement des véhicules doit participer, avec l'évolution des motorisations, à l'atteinte de ces objectifs.

La maîtrise des consommations énergétiques s'exprime également en termes économiques. On retient que la réduction d'1 kg sur la masse d'un avion permet d'économiser plusieurs milliers d'euros en carburant tout au long de sa durée de vie. Dans l'automobile, les impacts économiques importants apparaissent en période de renchérissement des prix du pétrole. De ce point de vue, l'existence de véhicules peu consommateurs dans la gamme des constructeurs est un avantage concurrentiel important durant ces périodes.

Les aspects précédents doivent être considérés en prenant en compte les autres enjeux du secteur des transports, notamment la sécurité. Ainsi, les véhicules « allégés » doivent présenter des performances au moins aussi bonne d'un point de vue mécanique. Par ailleurs, certaines contraintes spécifiques existent en fonction des domaines. Dans l'automobile, la maîtrise des coûts et la recyclabilité sont des spécifications importantes pour le choix des matériaux.

Marché

Les transports aériens et automobiles sont les principaux secteurs concernés, mais l'allègement des véhicules a également des

impacts bénéfiques dans les domaines ferroviaires et maritimes.

L'importance du marché peut s'apprécier, par exemple pour le transport routier, simultanément au regard du nombre de véhicules commercialisés et des masses correspondantes. En 2004, le marché français des voitures particulières a atteint deux millions de véhicules et le marché européen quinze millions. Au niveau européen, ce chiffre correspond à un marché de 2,2 à 2,3 Mt de plastiques et de plus de 10,5 Mt d'acier. Au niveau mondial, l'industrie automobile consomme 10 à 15 % de l'acier produit.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie du solide, matériaux, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : chimie macromoléculaire, chimie de base, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail matériaux, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : EMC2 (Pays de la Loire), Mipi (Lorraine), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes), Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : sécurité passive des véhicules ; moteurs à pistons ; turbomachines ; architecture électrique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; modélisation, simulation, calcul ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; fonctionnalisation des matériaux ; assemblage multimatériaux ; textiles techniques et fonctionnels.

■ Principaux acteurs français

Centre de compétences : Cetim.

Industriels : Airbus, Alcan, Arcelor, Inoplast, Montupet, Plastic Omnium Auto Exterior, PSA Peugeot Citroën, Renault, Saint Gobain, Timet Savoie, Vallourec. Plus largement, tous les équipementiers et sous-traitants sont impliqués dans l'allègement des véhicules. C'est particulièrement vrai dans le domaine aéronautique où les cahiers des charges des constructeurs accordent la plus haute importance à la réduction de masse.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, fabrication de verre et d'articles en verre, chimie, caoutchouc, plastiques, métallurgie et transformation des métaux, services de transports.

Transport

Commentaires

Cette technologie bénéficie en France de la présence simultanée de donneurs d'ordres dans le domaine des transports et de fournisseurs de matériaux qui sont des leaders mondiaux. Ces acteurs ont sur le territoire

des centres de décisions en matière d'innovation. Cette technologie est globalement mature, mais les contraintes environnementales et économiques, ainsi que la concurrence entre les matériaux entretiennent l'innovation.



61. Sécurité passive des véhicules

Description

Lorsque la sécurité active n'a pas permis d'éviter l'accident, la sécurité passive des véhicules a pour fonction d'en minimiser les conséquences pour les personnes, qu'elles soient dans le véhicule ou à l'extérieur (piétons...).

La sécurité passive nécessite une approche multidisciplinaire. La structure du véhicule est le premier élément de sécurité passive. Pour les voitures, la structure absorbe une partie de l'énergie du choc, et fait de l'habitacle une cellule de survie qui préserve les occupants contre l'intrusion de tout élément, mécanique ou autre. Le choix des matériaux est primordial à cet égard. La prévention de ces intrusions est également assurée par une disposition judicieuse des organes les plus dangereux.

La sécurité passive passe également par l'utilisation de systèmes de sécurité gonflables (airbags) qui, initialement réservés au conducteur, se propagent au sein de l'habitacle : passager avant, passagers arrière, airbags latéraux ou « rideaux », pour les membres inférieurs, etc.

Outre les chocs, la sécurité passive doit également prémunir les passagers contre les dommages liés au feu. Les matériaux de structure ou de revêtement de l'habitacle doivent être peu (ou pas) inflammables et ne pas dégager de gaz toxiques en cas de combustion (notamment, transports collectifs : avions, trains).

Enfin, la frontière entre sécurité active et sécurité passive s'estompe, cette dernière devenant de plus en plus interactive avec les systèmes électroniques de type ESP, ABS, capteurs de roues... l'enjeu étant d'anticiper autant que faire se peut les situations « désespérées ». Alors que les airbags se déclen-

chent sur détection d'un choc effectif (décélération brutale), les systèmes les plus avancés modifient le réglage des sièges ou « pré-tensionnent » les ceintures de sécurité avant le choc.

La sécurité passive a connu de nombreux développements au cours des dernières années. Mais des travaux restent nécessaires. Il s'agit de maintenir, et même d'améliorer, les performances en matière de sécurité alors que les matériaux et les architectures évoluent, notamment pour alléger les véhicules ou en vue de leur recyclage. De ce point de vue, les performances améliorées (en particulier mécaniques) à masse réduite des matériaux nanostructurés et nanocomposites seront probablement exploitées.

Enjeux, Impact

On estime à un million par an le nombre de morts dans les transports dans le monde (5 000 en France), principalement dans les transports routiers (y compris les piétons). Les blessés se comptent en millions. Les technologies de sécurité des véhicules, en particulier de sécurité passive, permettent de répondre à cet enjeu de société majeur.

Marché

Les marchés concernés couvrent tous les modes de transport. Des technologies de sécurité passive ont été développées depuis plusieurs décennies, mais sont à nouveau un sujet d'intérêt dans un domaine comme l'aéronautique.

La problématique de la sécurité passive est largement répandue dans le domaine automobile, et sa croissance est moins forte que celles des technologies de sécurité active des véhicules. Ainsi, le marché automobile européen de la sécurité passive était estimé

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

à 2,8 Md€ en 2003, et devrait atteindre 3 Md€ en 2010.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, énergétique, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : traitements de surface, matériaux-métallurgie, travail des matériaux, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre ; sécurité active des véhicules ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules.

■ Principaux acteurs français

Dans les domaines automobile et ferroviaire, les travaux de recherche en matière de sécurité (dont sécurité passive) sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres-www.predit.prd.fr).

Centres de compétences : Inrets, Onera... Industriels: Alstom, EADS-Airbus, Faiveley Transport, Faurecia, PSA Peugeot Citroën, Renault, Safran, Thales, Valéo...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs et équipementiers automobiles travaillent sur la sécurité passive des véhicules. Les constructeurs et équipementiers de l'aéronautique et du ferroviaire sont également concernés.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, commerce et réparation automobiles, services de transports.



62. Moteurs à pistons

Description

Développées et adaptées aux premières automobiles depuis le XIX^e siècle, les technologies des moteurs à pistons n'ont cessé de progresser. Aujourd'hui, l'innovation technologique est tirée par un double objectif : diminuer les consommations (en augmentant les rendements des moteurs) et réduire les émissions polluantes. Les réactions de combustion mises en jeu sont telles que ces objectifs peuvent difficilement être atteints simultanément, et qu'un optimum doit être recherché. Parallèlement, des technologies de traitement des gaz de combustion sont développées pour compléter les performances environnementales, et la qualité des carburants évolue. Les améliorations à apporter doivent être considérées du point de vue de l'ensemble du système et non pas seulement de la combustion.

Les innovations technologiques récentes concernent différents aspects :

- combustion : l'optimisation des chambres de combustion bénéficie des progrès de la modélisation numérique ;
- électronique : la plupart des paramètres de contrôle du moteur (injection, allumage, alimentation en air...) sont désormais pilotés avec une grande précision ;
- injection : l'apparition des systèmes d'injection haute-pression a permis une amélioration des performances des moteurs Diesel, grâce à une meilleure pulvérisation du carburant.

Des progrès importants sont encore possibles. On estime que les futurs moteurs Diesel et essence pourraient permettre des gains en consommation de 25 % à 30 % par rapport aux moteurs conventionnels actuels (à masse et motorisation du véhicule identiques). Ces progrès sont très fortement liés à

l'évolution des systèmes de contrôle et d'injection et de la modélisation.

Pour le moteur Diesel, les technologies en développement sont la combustion HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*) et les systèmes d'injection multiples (grâce à des systèmes de commande piézoélectriques très précis). La généralisation de la turbo-suralimentation, notamment à géométrie variable, permettra un rendement amélioré sur toute la gamme du régime moteur. La seule optimisation du fonctionnement du moteur ne suffira pas à respecter les limites réglementaires pour les émissions polluantes. Des technologies de post-traitement doivent également être mises en œuvre : filtres à particules et pièges à Nox pour les véhicules légers, filtres à particules et réduction catalytique sélective (SCR) pour les poids lourds.

L'enjeu pour le moteur à essence réside dans la réduction des émissions de CO₂, donc l'amélioration de son rendement énergétique. À l'horizon 2010, la généralisation de l'injection directe d'essence est une première réponse à cet enjeu. Mais la recherche actuelle porte déjà sur les concepts et systèmes qui seront mis en œuvre d'ici 10 à 15 ans : combustion par auto-inflammation (CAI - allumage par compression, sans bougie, comme dans le cas du Diesel) ; systèmes électroniques de distribution variable, pouvant aller à terme jusqu'à la technologie *camless* (suppression de l'arbre à cames), pour un réglage optimal en fonction des conditions d'utilisation du moteur ; *downsizing*, correspondant à une réduction de cylindrée couplée à la turbo suralimentation pour un maintien des performances ; taux de compression variable (VCR).

Ces évolutions sur les motorisations conven-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

tionnelles garantissent l'amélioration des performances environnementales des véhicules de transport avant le déploiement significatif des modes de propulsion alternatifs de rupture : moteurs électriques, piles à combustibles... Elles accompagnent également le déploiement des modes de propulsion hybrides, en renforçant leur rendement. Par ailleurs, ces évolutions se font en parallèle avec l'évolution des carburants. Des moteurs à pistons conventionnels peuvent être adaptés pour pouvoir utiliser des proportions croissantes de biocarburants (éthanol, diesters...), ou fonctionner avec des carburants gazeux (GNV...).

Enjeux, Impact

En 25 ans, la consommation de carburant liée aux transports a augmenté de 70 % en France, en raison de :

- la croissance continue des trafics de marchandises et de voyageurs, ainsi que des distances parcourues ;
 - la progression du transport routier, le plus consommateur et le plus polluant ;
 - l'augmentation de la mobilité urbaine et périurbaine, due à l'extension des villes.
- Il en est résulté, malgré les progrès techniques :
- un accroissement des émissions polluantes ;
 - un accroissement des émissions de gaz à effet de serre (gaz carbonique), responsables du changement climatique.

Les transports représentent, aujourd'hui, une part importante de certaines émissions polluantes et de gaz à effet de serre. Au niveau européen, la contribution des transports aux émissions d'oxydes d'azote (Nox) et de monoxyde de carbone (CO) atteint près de 70 % ; en France, les transports représentaient 27 % des émissions de gaz carbonique (CO₂) en 2002.

Pour la France, l'enjeu de la maîtrise de cette technologie est de :

- contribuer aux indispensables efforts de réduction des émissions polluantes et de gaz à effet de serre au niveau mondial ;
- pérenniser et développer l'expertise technique et industrielle française en matière de moteurs à pistons, avec les conséquences positives en termes d'emploi et de balance commerciale.

Les enjeux environnementaux trouvent déjà largement leur traduction aux niveaux réglementaires et normatifs en Europe (ainsi qu'aux États-Unis et au Japon par exemple). Au niveau européen, les directives 70/220/EEC (consolidée), 88/77/EEC (consolidée), notamment, se déclinent au travers des normes d'émissions : euro 4, euro 5, euro 6.

Le principal impact sera le renforcement de la compétitivité de l'industrie française dans les moteurs et les secteurs d'application. L'horizon temporel prévisible de l'impact, pour une amélioration de la technologie, est de 5 ans (délai cumulé de R&D et d'industrialisation des nouvelles solutions développées).

Marché

Les applications des moteurs à pistons dans les transports sont multiples :

- transport routier : deux roues, voitures, véhicules utilitaires, poids lourds ;
- ferroviaire : locomotives, trains automoteurs ;
- propulsion navale ;
- aviation légère ;
- production d'électricité ;
- machines agricoles.

Les moteurs à pistons représentent un marché d'environ 120 millions d'unités par an dans le monde, dont plus de la moitié sont destinés au secteur des transports routiers. Ainsi 45 millions de moteurs à essence et 12 millions de moteurs Diesel pour l'automobile sont concernés chaque année, ainsi que trois millions de moteurs Diesel pour les poids lourds et les bus et un million de moteurs au gaz (essentiellement pour les bus).

Le marché des transports routiers est véritablement celui qui tire l'innovation technologique, en particulier parce qu'il est soumis aux réglementations les plus drastiques et que la concurrence y est très développée. Le marché mondial des moteurs à pistons pour automobiles connaît des disparités régionales importantes. Les moteurs Diesel ont connu un essor très important en Europe depuis dix ans, alors que les marchés japonais et surtout nord-américain restent quasi exclusivement réservés aux moteurs à essence. Ces trois grands marchés sont sou-

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche, industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, industries des équipements mécaniques, commerce et réparation automobiles, services de transports.

mis à des réglementations spécifiques, qui diffèrent, notamment, sur les seuils d'émissions et les méthodes de mesure. Globalement, ces réglementations convergent sur les aspects liés aux émissions polluantes. En revanche, le contexte réglementaire en matière de gaz à effet de serre est très hétérogène.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, énergétique, mécanique des fluides, mécanique, génie des matériaux, électronique.

■ Compétences technologiques : traitements de surface, matériaux-métallurgie, travail des matériaux, environnement-pollution, moteurs-pompes-turbines, procédés thermiques, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Céramique (Limousin et Midi-Pyrénées), Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : carburants de synthèse issus de la biomasse ; turbomachines ; acoustique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules, architecture électrique des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; modélisation, simulation, calcul ; procédés catalytiques.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Certam (Rouen), Coria (Rouen), IFP.

Industriels : Le Moteur moderne, MCE-5,

PSA Peugeot Citroën, Renault, Renault Trucks, Semt Pielstick.

Dans le domaine des transports routiers, des travaux de recherche en matière de motorisation sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres-www.predit.prdd.fr).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs et les équipementiers automobiles sont impliqués dans les évolutions technologiques sur les moteurs à pistons. La liste ci-dessous propose une sélection des industriels et centres de compétences particulièrement actifs (hors France) : Bosch (Allemagne), Caterpillar (États-Unis), Delphi (États-Unis), Ford (États-Unis), Honeywell-Garrett (États-Unis), Mitsubishi Motors (Japon), Nissan (Japon), Toyota (Japon), Ricardo (UK), Université de Lund (Suède), Wärtsilä (Finlande).

Commentaires

L'innovation dans le domaine est largement conditionnée par les objectifs de réduction des consommations et de limitation des émissions polluantes. Les options technologiques pour le respect des limites réglementaires en matière d'émissions polluantes à l'horizon 2010 sont déjà levées : il reste à les mettre au point et à les industrialiser. L'innovation technologique se situe plus en amont, sur des systèmes et concepts qui seront sur les marchés à l'horizon 2015 - 2020. L'expertise technologique et industrielle française en matière de moteurs à pistons est très importante.

Transport



63. Turbomachines

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Le cœur d'une turbomachine est constitué d'un ensemble compresseur-chambre de combustion-turbine. L'énergie primaire est fournie par la combustion d'un mélange air-combustible réalisé dans une chambre de combustion. Les gaz de combustion sont détendus dans une turbine, dont la partie mobile entraîne mécaniquement le rotor d'un compresseur qui établit un débit d'air et le comprime avant son admission à la chambre de combustion. En sortie de cet ensemble, les gaz chauds possèdent une énergie élevée qui est valorisée sous forme de poussée (détente dans une tuyère) ou de couple sur un arbre (détente et mise en rotation d'une turbine). Dans le cas des turboréacteurs à grand taux de dilution des avions de transport, l'utilisation de cette énergie est mixte (poussée et entraînement d'un « compresseur basse pression »).

À partir de ce principe simple, une turbomachine est un système d'une grande sophistication et d'une grande complexité, dont le développement et la mise au point nécessitent l'expertise d'équipes pluridisciplinaires de haut niveau. Les axes de recherche et développement visent, globalement, à réduire la consommation et la pollution (toutes applications), tout en allégeant le moteur (dans l'aéronautique) et en réduisant les dépenses d'entretien. Les recherches concernent les axes de travail suivants :

- l'architecture d'ensemble : les sous-ensembles constitutifs d'une turbomachine sont composés d'éléments aérodynamiques (aubes de compresseur ou de turbines) qui ont des plages de fonctionnement optimal restreintes. Il est donc nécessaire de concevoir des turbomachines à plusieurs corps (un corps est un ensemble solidaire compres-

seur-arbre-turbine), chaque corps tournant à une vitesse différente. Si le « double corps » a longtemps été le plus répandu, le constructeur britannique Rolls-Royce maîtrise l'architecture « triple corps » (famille de moteurs Trent, dont les Airbus A380 et A350 pourront être équipés). L'architecture à arbres contrarotatifs permet d'optimiser les transferts d'énergie entre turbines, et donc de réduire la consommation. Pour les applications de surface (trains, navires, énergie), le relâchement des contraintes de masse et d'encombrement permet d'exploiter d'autres pistes : échangeurs thermiques entre étages, pré ou post-traitement des gaz, cogénération... ;

- le dessin aérodynamique des composants (disques et aubes, chambres de combustion) bénéficie de progrès continus, rendus possible en particulier par la simulation numérique ;
- les éléments d'une turbomachine sont soumis à des vitesses de rotation (éléments tournants) et des températures élevées, et doivent être constitués de nouveaux matériaux à la fois plus légers et plus résistants : matériaux composites à matrice organique (parties froides), matériaux composites à matrice métallique ou intermétallique (titane, aluminium, niobium) pour les parties plus chaudes, superalliages à base de nickel pour les aubes et les disques de turbines, matériaux céramiques... ;
- la chambre de combustion est optimisée pour répondre à des critères contradictoires : une température de combustion élevée est en effet favorable à un bon rendement énergétique, mais produit des oxydes d'azote. Les chambres de combustion sont de plus en plus compactes et de plus en plus complexes : à double tête, à prémélange, à combustion turbulente... ;
- la régulation électronique des turbomachi-

nes FADEC (*Full Authority Digital Engine Control*) contribue à l'optimisation des performances d'ensemble ;

- enfin, les turbomachines intègrent des technologies nécessaires à la réduction du bruit, à la résistance à l'ingestion de corps étrangers (moteurs aéronautiques), à la lubrification, etc.

Enjeux, Impact

L'enjeu pour la France de la maîtrise de cette technologie est de :

- contribuer aux indispensables efforts de réduction des émissions polluantes et de gaz à effet de serre au niveau mondial ;
- pérenniser et développer des pans entiers de l'économie (aéronautique, transports de surface, production d'énergie,...), avec les conséquences positives en termes d'emploi et de balance commerciale.

Le principal impact sera le renforcement de la compétitivité de l'industrie française dans les moteurs aéronautiques, les turbines de puissance, et par conséquent dans les secteurs d'application. Les processus de développement industriel conduisent rarement à concevoir « depuis une page blanche » une turbomachine entièrement nouvelle : le plus souvent il s'agit de perfectionnements successifs de systèmes existants, qu'on vient enrichir de briques technologiques issues des centres de R&D. On ne peut donc pas définir d'horizon calendaire pour l'impact de ces technologies. Gardons cependant à l'esprit qu'une innovation disponible aujourd'hui dans un laboratoire ne sera pas intégrée sur une turbomachine opérationnelle avant typiquement 5 ans, compte tenu des cycles industriels et des démarches de qualification nécessaires (et de certification pour les aéronefs).

Marché

La propulsion aéronautique est le principal moteur des progrès technologiques des turbomachines :

- turboréacteurs des avions militaires (Rafale, Mirage 2000), des avions de transport civils (familles Airbus et Boeing, certains avions de transport régionaux) ;
- turbopropulseurs des avions de transport régionaux (ATR) ou militaires (Transall, prochainement remplacé par l'Airbus 400M) ;

- turbomoteurs des hélicoptères.

Plus de 15 000 nouveaux avions commerciaux devraient entrer en service entre 2005 et 2020, tous équipés de turbomachines.

Les turbomachines sont également utilisées pour la propulsion de certains trains ou navires (Queen Mary II), et pour la production d'électricité. Pour cette dernière application, les centrales à cycles combinés incluant des « turbines à gaz » présentent une grande flexibilité, notamment pour leur construction (les délais de réalisation sont d'environ deux ans, contre quatre ans pour une centrale à charbon propre, et huit ans pour une tranche nucléaire). La conception de ces centrales, généralement modulaire, permet d'ajuster le rythme d'évolution du parc à celui de la demande électrique. Leur mode de fonctionnement permet aussi de moduler la puissance en service de façon souple, grâce à la grande rapidité de démarrage d'une telle centrale (couverture des « pics » de demande électrique).

Acteurs

■ **Disciplines scientifiques** : composantes électroniques et génie électronique, informatique, sciences des matériaux, mathématiques et algorithmique, génie industriel, physique appliquée, physico-chimie, génie mécanique et de la construction, génie aérospatial.

■ **Compétences technologiques** : production et utilisation de l'énergie électrique, stockage de l'énergie électrique, composantes électroniques, informatique, analyse, mesure, contrôle, génie des procédés, traitement de surface, matériaux, métallurgie, environnement, pollution, environnement : traitement du bruit, moteurs thermiques, transports terrestres et équipements.

■ **Liens avec (technologies)** : carburants de synthèse issus de la biomasse ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; moteurs à pistons ; acoustique des véhicules ; architecture électrique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; modélisation, simulation, calcul ; capteurs intelligents et traitement du signal ; assemblage multimatériaux ; nouveaux procédés de traitement de surface.

■ **Pôles de compétitivité** : Normandy Motor

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur.

Transport

Valley (Basse et Haute-Normandie), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Céramique (Limousin et Midi-Pyrénées).

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Onera, DGA (Centre d'essais des propulseurs), École centrale Lyon (Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique)...

Industriels : Groupe Safran (Snecma, Turbomeca), Alstom...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : General Electric (États-Unis), Pratt & Whitney (États-Unis, Canada), Rolls-Royce (Royaume-Uni), Siemens Power Generation

(Allemagne), MTU (Allemagne), MAN (Allemagne), Volvo (Suède),...

Commentaires

Les activités moteurs du groupe Safran en font le 4^e motoriste mondial, derrière General Electric, Rolls-Royce et Pratt & Whitney. La coentreprise CFM (Snecma - General Electric) est un exemple de coopération transatlantique réussie.

Les transferts de technologie du monde aéronautique vers les turbines terrestres ou marines permettent des progrès continus dans les rendements de ces systèmes.



64. Acoustique des véhicules

Description

Cette famille de technologies vise à réduire les nuisances acoustiques engendrées par les véhicules qui touchent, d'une part les passagers, d'autre part les riverains des voies de circulation (aériennes, terrestres). Il s'agit de lutter contre les bruits émis par quatre types de sources : l'ensemble propulsif, l'aérodynamique du véhicule, le contact roue-voie, les équipements. Les contributions respectives de ces sources au bruit généré par le véhicule dépendent notamment de la vitesse du véhicule. À faible vitesse, le bruit de l'ensemble propulsif sera généralement prépondérant, alors que les bruits aérodynamiques le deviennent à haute vitesse.

La réduction du bruit fait appel à plusieurs méthodes qu'il convient d'associer dans une logique « système », qui implique :

- la conception des sous-ensembles, en intégrant « en amont » les préoccupations acoustiques : dessin aérodynamique de l'enveloppe du véhicule ou des aubes de turbomachines, choix des matériaux ad hoc, intégration dans le véhicule des sources de bruit, pour masquer le bruit ou privilégier sa propagation dans une direction moins nuisible ;
- la disposition, autour des sources de bruit, de matériaux ou d'organes ayant pour effet d'absorber les vibrations (pour éviter leur propagation dans l'atmosphère ou au reste du véhicule) ;
- le contrôle actif du bruit, qui consiste, quand il s'avère impossible de réduire suffisamment un bruit à la source ou par l'adjonction de dispositifs absorbants, à générer un bruit en opposition de phase, qui annule le bruit contre lequel on veut lutter.

Enjeux, Impact

En France, les études de l'Insee sur la qualité de vie dans les agglomérations de plus de 50 000 habitants montrent que le bruit reste la première source de nuisances ressenties par les populations citadines.

La directive cadre 2002/49/CE est relative à l'évaluation et la gestion du bruit ambiant dans l'environnement. Pour le transport aérien, la directive relative à l'établissement de règles et de procédures concernant l'introduction de restrictions d'exploitation liées au bruit dans les aéroports de la Communauté a été adoptée le 26 mars 2002 (directive 2002/30/CE).

On attend de la maîtrise de cette technologie un impact sur :

- la compétitivité économique globale, par amélioration de la qualité de vie de millions de Français (et donc réduction des pathologies causées par le bruit) ;
- la compétitivité économique du secteur des transports.

Marché

Selon l'Ademe, 80 % du bruit dans l'environnement (territoire français) est produit par le secteur des transports routiers (68 %), aériens (20 %) et ferroviaires (12 %). Alors que l'OMS (Organisation mondiale de la santé) recommande un niveau de bruit ambiant inférieur à 35 dB pour un repos nocturne convenable, on dénombre en France près de 3 000 points noirs, représentant plus d'un million de personnes, pour lesquels le bruit ambiant ne descend jamais sous 65 dB. Dans le cas du transport aérien, les perspectives de croissance du trafic permettent d'anticiper l'évolution des nuisances sonores associées. On prévoit ainsi que, au cours des vingt prochaines années, les transports

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

aériens de passagers et de fret pourraient augmenter respectivement de 4,9 % par an et 6,4 % par an (en volume). En 2021, le nombre d'appareils en circulation dans le monde pourrait atteindre 32 500 unités.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, physique théorique, mécanique des fluides, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux, génie civil.

■ Compétences technologiques : traitements de surface, matériaux - métallurgie, travail des matériaux, environnement - pollution, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : EMC2 (Pays de la Loire), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; turbomachines ; moteurs à pistons ; acquisition et traitement de données.

■ Principaux acteurs français
Centres de compétences : DGA (Centre

d'essais des propulseurs), IAT-Cnam (St-Cyr l'École), Inrets (LICIT, LTE), LCPC, LMFA (Lyon), Onera, Service technique de l'aviation civile.

Industriels : 01dB Metravib, Alstom, EADS-Airbus, Dassault Aviation, EADS-Eurocopter, Faiveley Transports, Foampartner, PSA Peugeot Citroën, Renault, SnCF, Snecma et Turbomeca (Groupe Safran), Vibratec.

Dans le domaine des transports terrestres, la mise en commun des compétences et moyens des acteurs français est notamment réalisée au sein du CNRT R2A (Centre national de recherche technologique aérodynamique et aéroacoustique des véhicules terrestres - www.cnrt2a.asso.fr) et du GIE S2A (Soufflerie aéroacoustique automobiles - www.gies2a.fr).

Commentaires

Les bruits des transports sont considérés comme une nuisance environnementale importante en Europe. En France et en Allemagne, les ministères et agences concernés ont décidé de renforcer la coopération en matière de recherche sur le bruit des transports terrestres au sein de la structure Deufrako (www.deufrako.org).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, recherche et développement.



65. Architecture électrique des véhicules

Description

L'électricité prend une place prépondérante dans le schéma énergétique des véhicules, notamment dans la distribution interne d'énergie, ce qui entraîne :

- la disparition programmée de l'énergie hydraulique ou pneumatique à bord des avions (concept de l'avion « tout électrique »), les différents actionneurs hydrauliques étant remplacés par des organes mécatroniques (surfaces de contrôle aérodynamique, trains d'atterrissage, freins...). Les répercussions de cette tendance ont des conséquences immédiates sur l'allègement de l'appareil, mais également des conséquences indirectes, comme sur les moteurs qui verront bientôt disparaître le prélèvement d'air (conséquences positives, puisque le prélèvement d'air sur les moteurs écarte leur point de fonctionnement de l'optimum). Le besoin électrique global d'un avion gros porteur s'approche de 1 MW ;

- l'augmentation de la quantité d'équipements électriques à bord des véhicules automobiles : direction assistée électrique, le pare-brise chauffant, une climatisation électrique... sans omettre l'hybridation plus ou moins poussée de la motorisation des véhicules routiers (association au moteur thermique d'un moteur électrique ou d'un alternateur-démarrateur). Une berline consommera bientôt 1 kW d'énergie électrique.

Ces tendances rendent nécessaires des architectures électriques assurant la distribution de la puissance électrique en fonction des besoins. Les avions utilisent depuis longtemps le 28 V continu et le 115 V alternatif. Concernant l'automobile, le passage de la tension standard évoluera, avant 2010, de 12 V à 42 V.

Les principales problématiques de ces tech-

nologies sont la recherche de compromis entre sûreté de fonctionnement et performances système, ainsi que l'intégration d'organes électriques multifonctionnels (par exemple, assurant filtration du signal électrique et stockage).

Le principal verrou de cette technologie concerne l'intégration électronique de puissance. Il s'agit d'intégrer des convertisseurs électroniques de puissance à base de MOS (*Métal-Oxyde-Semi-conducteur*) de puissance ou d'IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, en français transistor bipolaire à grille isolée), afin de créer une rupture technologique pour réduire les masses, volumes et coûts de façon significative. Cet ensemble concerne les matériaux substrats, les semi-conducteurs de puissance, le Sic (carbure de silicium), le diamant, les technologies de report et de packaging, le fonctionnement à haute température (200°C) et les techniques de refroidissement actives et passives. Les méthodes de construction robustes et les process critiques d'assemblage sur ligne pilote représentent des enjeux forts.

Enjeux, Impact

Cette technologie est au cœur de toute stratégie de contrôle de l'énergie et des systèmes hybrides. Elle participe à l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules et contribue à réduire les effets de serre.

Les industriels leaders en matière d'innovation auront également un avantage dans l'établissement des standards et normes, et en matière de compétitivité.

Marché

Tous les modes de transport sont concernés : la conversion d'énergie pour la commande de moteur électrique de propulsion

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

ferroviaire, automobile (véhicule hybride), les commandes de tous les actionneurs de l'avion « tout électrique », les véhicules militaires, la propulsion marine, les tracteurs agricoles... Plus généralement, tout système qui nécessite de disposer d'une commande électronique de puissance (de 500 watts à plusieurs centaines de kilowatts), dans un encombrement faible et un environnement difficile, fait appel à cette technologie.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : mécanique, informatique, traitement du signal, électronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, informatique, analyse, mesure et contrôle, procédés techniques.

■ Pôles de compétitivité : Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), System@tic (Île-de-France), Véhi-

cule du futur (Alsace et Franche-Comté), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes), Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : sécurité active des véhicules ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; moteurs à pistons ; turbomachines ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : IEMN (Lille), LEEI (Toulouse), Onera, Laboratoire Pearl (Tarbes). Industriels : Acome, Airbus, Alstom, ESI Group, Eve System, Faurecia, Labinal (Groupe Safran), Nexans, PSA Peugeot Citroën, Renault, Schneider Electric, Valéo.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs de véhicules et les équipementiers. Dans le domaine automobile : Boeing (États-Unis), Delphi (États-Unis), Lear (États-Unis), Tyco (États-Unis), Denso (Japon), Bosch (Allemagne), Siemens VDO (Allemagne) ...

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, industries des équipements électriques et électroniques, fabrication de matériel électrique, commerce et réparation automobiles, services de transports.



66. Architecture électronique des véhicules

Description

L'électronique à bord des véhicules permet d'assurer un nombre croissant de fonctions plus ou moins critiques :

- communications (téléphonie, médias...) ;
- aides au voyage (positionnement, informations trafic...) ;
- aides à la conduite et sécurité (ABS, ESP, direction assistée...) ;
- régulation des organes principaux (allumage moteur, boîte de vitesse...).

Une berline actuelle embarque plus d'électronique que les premiers Airbus, et l'extrapolation des tendances conduit à la vision suivante : l'automobile de 2010, comme l'ordinateur personnel d'aujourd'hui, sera composé de modules électroniques assurant des fonctions plus ou moins étendues, gérés par un « système d'exploitation ».

Globalement, les problématiques seront donc très proches de celles de l'informatique (intégration logiciel-matériel, arbitrage entre répartition ou centralisation des fonctions, miniaturisation, protocoles de communication, interopérabilité...), sans oublier l'impérieuse exigence de fiabilité et de robustesse. L'évolution des matériels et des architectures électroniques impose des améliorations en termes de processus d'ingénierie des systèmes embarqués et d'ingénierie des systèmes complexes. Les verrous associés à ces technologies constituent les principaux freins à la mise au point technique de l'architecture électronique des véhicules.

Par ailleurs, l'architecture électronique ne peut plus être élaborée sans interaction forte avec l'architecture électrique des véhicules. La rationalisation des réseaux de câbles au sein des véhicules conduit, en effet, à envisager l'utilisation des techniques de courants porteurs (PLC ou *Power Line Communication*).

Enfin, l'architecture électronique des véhicules doit être réalisée pour permettre une évolution des systèmes en parallèle avec l'évolution des informations extérieures au véhicule qui lui sont transmises.

Enjeux, Impact

Les principaux enjeux et impact de la mise au point d'une architecture électronique des véhicules performante sont associés aux enjeux du développement des fonctions critiques comme le contrôle de la propulsion (impact sur les émissions de gaz à effet de serre) et la sécurité.

Par ailleurs, cette architecture électronique améliorée accompagne le développement de véhicules à plus forte valeur ajoutée. Ceci garantit, par l'innovation, la compétitivité des industries françaises de construction de véhicules.

Marché

Les marchés de l'électronique pour véhicules sont dynamiques, particulièrement pour l'automobile. Le marché de l'électronique pour automobile a progressé plus vite que le marché global de l'électronique et que la production de véhicules. L'électronique automobile devrait progresser à un rythme voisin de 7 % par an (en valeur) d'ici à 2010. À cette période, l'automobile pourrait représenter 9 % du marché de l'électronique européen, et l'aérospatiale et la défense 6,5 %. Ces chiffres sont confirmés dans le cas particulier des semi-conducteurs : les ventes de semi-conducteurs destinés aux systèmes automobiles représenteront 16,3 Md\$ en 2005 et devraient même grimper à 25,7 Md\$ d'ici 2012.

La part de l'électronique dans l'automobile est en progression. Elle devrait atteindre

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

30 %, en valeur, en 2008. Une partie importante du contenu électronique sera à terme représentée par le logiciel embarqué. On estime qu'en 2010 plus de 40 % de la valeur de l'électronique automobile se situera dans le logiciel.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : mécanique, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île - de-France), Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : ingénierie des

systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; moteurs à pistons ; turbomachines ; architecture électrique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inrets, Inria, LAAS (Toulouse), Loria (Nancy).

Industriels : Airbus, Alstom, Dassault Electronique, Faurecia, PSA Peugeot Citroën, Renault, Safran, ST Microelectronics, Thales, Valéo.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs et équipementiers des transports sont impliqués. À titre d'exemple, dans l'automobile, Delphi (États-Unis), Lear (États-Unis), Tyco (États-Unis), Honeywell (États-Unis), Johnson Controls (États-Unis), Visteron (États-Unis), Denso (Japon), Bosch (Allemagne), Siemens VDO (Allemagne)... sont concernés par cette technologie.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, industries des équipements électriques et électroniques, fabrication de composants électroniques, commerce et réparation automobiles, services de transports.



67. Gestion de l'énergie à bord des véhicules

Description

Un véhicule est un système dans lequel trois sources d'énergie sont étroitement liées : l'énergie mécanique, qui sert à mettre en mouvement le véhicule ou certains sous-ensembles (surfaces de contrôle des aéronefs, direction d'une voiture...), l'énergie électrique, nécessaire notamment pour l'alimentation de diverses fonctions (éclairage, communications...), et l'énergie thermique (climatisation de l'habitacle, chaleur produite par le moteur ou le freinage...). Jusqu'à un passé récent, peu d'efforts étaient engagés pour optimiser la gestion de ces énergies : le pétrole, abondant et bon marché, fournissant, par combustion dans le moteur, l'énergie mécanique, dont une partie était transformée en électricité (par l'alternateur), une grande partie de l'énergie thermique étant perdue. C'est une des raisons qui fait que, malgré des progrès indéniables accomplis sur les moteurs, l'ordre de grandeur de la consommation des véhicules routiers n'a pas changé depuis trente ans, passant de 10 à 7 litres pour 100 km. Par ailleurs, certains équipements consommateurs d'énergie se démocratisent. La climatisation automobile devient ainsi un poste de consommation énergétique de plus en plus important.

L'objet de cette technologie est d'optimiser le rendement énergétique global des véhicules par une valorisation d'une partie de l'énergie aujourd'hui perdue. À titre d'illustration, des développements plus ou moins aboutis explorent les pistes suivantes (automobile) :

- récupération et stockage à bord, sous forme d'énergie électrique, de l'énergie dissipée lors du freinage ;
- valorisation de l'énergie solaire absorbée par un véhicule en stationnement ;
- récupération et conversion de l'énergie

thermique du moteur ou du pot d'échappement, valorisée sous forme d'électricité (par la thermoélectricité, par exemple) ;

- hybridation plus ou moins poussée, consistant à associer un moteur électrique, ou un alerno-démarrreur, au moteur thermique, pour la propulsion du véhicule dans certaines phases de conduite.

Les principaux verrous qui freinent le développement de ces technologies sont économiques. L'intégration de ces technologies conduira à augmenter le coût de développement et de construction des véhicules. En 2005, les consommateurs (pour ce qui concerne l'automobile) ne semblent pas prêts à faire le pari d'un surcoût à l'achat, en contrepartie d'une baisse du coût d'exploitation. La période de pétrole bon marché, dont nous sortons à peine, a en outre ralenti ou stoppé les développements industriels et bon nombre de recherches publiques sur ces sujets. En outre, le transport ne paie pas les externalités qu'il engendre.

Sur le plan technique, la disponibilité de composants électroniques de puissance, en quantité suffisante et à des coûts abordables, rendra possible la diffusion de la technologie. Enfin des avancées restent nécessaires pour améliorer la capacité des dispositifs de stockage de l'énergie électrique, en particulier les batteries.

Enjeux, Impact

En 25 ans, la consommation de carburant liée aux transports a augmenté de 70 % en France, en raison de :

- la croissance continue des trafics de marchandises et de voyageurs ainsi que des distances parcourues ;
- la progression du transport routier, le plus consommateur et le plus polluant ;

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

- l'augmentation de la mobilité urbaine et périurbaine, due à l'extension des villes.

Il en résulte, malgré les progrès techniques, un accroissement des émissions de gaz à effet de serre (gaz carbonique), responsables du changement climatique. La part liée aux transports pourrait représenter 27 % des émissions françaises en 2010, contre 22 % en 1990.

D'après les études menées par des constructeurs automobiles, 80 % de l'énergie consommée serait perdue sur les automobiles : 60 % de pertes thermiques, 10 % par frottement et 10 % par pompage. L'énergie mécanique disponible représenterait ainsi 20 % de l'énergie consommée.

L'enjeu pour la France de la maîtrise de cette technologie est de :

- contribuer aux indispensables efforts de réduction des émissions polluantes et de gaz à effet de serre au niveau mondial ;
- pérenniser et développer l'industrie des équipements de transport, avec des conséquences positives en termes d'emploi et de balance commerciale ;
- devenir leader dans le domaine réglementaire et normatif.

L'impact sera progressif, car ces technologies ne seront pas intégrées simultanément dans les véhicules. Un ordre de grandeur réaliste est une réduction de 30 % de la consommation des véhicules à horizon de dix ans. La compétitivité de l'industrie française des constructeurs et équipementiers de véhicules sortira renforcée de l'adoption de ces technologies.

Marché

Tous les types de transports sont concernés par les problématiques de gestion de l'énergie. Le marché automobile reste encore peu exploité, mais les technologies liées à la gestion de l'énergie devraient fortement s'y développer. À titre d'exemple, on attend une croissance très importante du marché (aujourd'hui peu développé) des batteries pour véhicules hybrides et électriques à l'horizon 2010. Le taux de croissance annuel pourrait atteindre 50 % en valeur sur la période 2005-2008, pour un marché de 250 M\$ en 2008.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : énergétique, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : composants électriques, procédés techniques, environnement - pollution, moteurs - pompes - turbines, procédés thermiques, composants mécaniques, transports, spatial - armement.

■ Liens avec (technologies) : infrastructures routières intelligentes ; moteurs à pistons ; turbomachines ; architecture électrique des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; capteurs intelligents et traitement du signal.

■ Pôles de compétitivité : EnRRDIS (Rhône-Alpes), Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes).

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, École des mines (Paris), Ierset (Toulouse), IFP, Inria, Green (Nancy), Inrets (LTE, LTN), LEEI (Toulouse).

Industriels : Alstom Transport, Dassault, EDF, ESA, Faiveley Transport, Irisbus, Labinal (Groupe Safran), Safran, Saft, Schneider Electric, Siemens VDO, Valéo, Thales.

Pour en savoir plus, une base de données des acteurs du domaine est disponible en ligne sur le site du Cereveh (Centre d'études et de recherches sur les véhicules électriques et hybrides - www.cereveh.org/fr/internet/annu.htm).

Les travaux de recherche en matière de véhicules routiers économes sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - www.predit.prd.fr).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, recherche et développement.



68. Liaisons de données véhicule - infrastructure

Description

L'avènement des systèmes de transport intelligents, qui contribueront à améliorer simultanément le niveau de sécurité, la fluidité du trafic, et l'efficacité énergétique repose en grande partie sur la transmission de flux de données entre les véhicules et les infrastructures :

- à grande distance (du kilomètre à quelques centaines de kilomètres) : l'objectif est la gestion du trafic pour, par exemple, assurer la sécurité du transport aérien, optimiser la gestion des flottes de véhicules routiers commerciaux, permettre une exploitation interopérable des corridors ferroviaires européens, informer les usagers des transports en commun ;

- à moyenne distance (de 10 mètres à quelques centaines de mètres) : il s'agit de transmettre une information d'ordre « tactique », c'est-à-dire :

- dans le transport terrestre, informer le véhicule en amont d'un accident ou d'un véhicule immobilisé, afin que le conducteur adapte sa vitesse ou sa trajectoire ;

- dans le transport aéronautique, aider à l'atterrissage de précision ou de guidage au sol ;

- à courte distance (de quelques centimètres à quelques mètres) : essentiellement dans le transport routier, les signaux émis par l'infrastructure vers le véhicule apportent des fonctions de guidage ou d'aide à la conduite, avec une constante de temps de quelques fractions de seconde.

Ces flux de données viennent compléter les communications radio traditionnelles, principal mode de transmission utilisé à l'heure actuelle. Au niveau du transport aérien, des liaisons de données dans les deux sens, permettant d'échanger des informations écrites concernant la navigation de l'appareil, sont

d'ores et déjà en place au niveau commercial.

Le développement des liaisons de données est indissociable des évolutions en matière de systèmes embarqués (capteurs de fonctionnement, de navigation, de gestion...) et des systèmes sur l'infrastructure (traitement des données, surveillance, communication, outils d'aide à la décision). Au-delà de cette intégration, les liaisons de données doivent également être mises au point en considérant les conditions d'interopérabilité au niveau régional ou mondial.

Dans le transport aérien, l'intégrité des données échangées est un enjeu technique majeur. Pour le transport routier, la capacité des technologies à être déployées à grande échelle, à un coût raisonnable, doit être recherchée. Par ailleurs, ces technologies doivent être suffisamment évolutives pour permettre le traitement des informations qui seront délivrées par les futurs systèmes embarqués.

Enjeux, Impact

Les enjeux traités par ces technologies sont plus largement les enjeux des systèmes de transports intelligents : amélioration de la sécurité, gestion optimisée des flux de véhicules pour des impacts environnementaux réduits et une compétitivité accrue des transports.

L'enjeu est particulièrement important dans le domaine du transport aérien, pour résoudre les problèmes de capacité que connaît la gestion du trafic ATM (*Air Traffic Management*). Ces problèmes s'expriment notamment en termes d'espace aérien et de procédures, de diversité des systèmes et des contraintes humaines en vol ou au sol. Les liaisons de données véhicule-infrastructure

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

doivent participer à l'intégration, dans un même espace aérien, de la gestion des flux de circulation aérienne, des aéroports, des centres de contrôle du trafic aérien, des aéronefs et des centres d'exploitation des lignes aériennes.

Dans le transport ferroviaire, l'enjeu est le développement des réseaux européens pour améliorer la compétitivité et la sécurité du transport ferroviaire. La réponse à cet enjeu passe, notamment, par le déploiement d'ERTMS (*European Rail Traffic Management System*). L'introduction d'un système de signalisation, de contrôle commande et de communication harmonisé va faciliter l'exploitation internationale des services ferroviaires, permettre l'utilisation optimale de la capacité des lignes et assurer un haut degré de sécurité et de fiabilité.

Pour les acteurs français, un autre enjeu réside dans la participation aux travaux pré-normatifs, afin de promouvoir les technologies développées. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine des transports terrestres où l'élaboration des normes est en cours.

Marché

Tous les domaines des transports sont concernés, les applications apparaissant particulièrement critiques dans les domaines aéronautiques et routiers.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : optique, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), informatique, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, transports, spatial - armement, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Images et réseaux (Bretagne), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Génie civil ouest (Pays

de la Loire), Elopsys (Limousin et Midi-Pyrénées), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Ville et mobilité (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes), ■ Liens avec (technologies) : infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Eseo (Angers), Inrets, Inria, Livic (Inrets-LCPC), Onera, Service technique de la navigation aérienne.

Industriels : Airbus, Alstom, Thales.

Pour les transports terrestres les problématiques de liaisons de données véhicule-infrastructure sont notamment prises en compte dans le cadre des travaux du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - www.predit.prd.fr).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Pour le transport aérien, ces problématiques sont gérées au niveau international ; des discussions ont notamment lieu dans le cadre de l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale - www.icao.int).

Commentaires

Au niveau européen, Ertico (*Intelligent Transport Systems & Services* - www.ertico.com) est chargé de la promotion des systèmes de transports routiers intelligents, dont les liaisons de données sont une composante.

La dimension européenne du développement et de la mise en œuvre de ces technologies est indispensable pour constituer des normes applicables à l'échelle mondiale. Le système ERTMS (*European Rail Traffic Management System* - www.ertms.com) dans le domaine ferroviaire apparaît de ce point de vue un exemple de succès dans l'établissement d'un standard international.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, industries des équipements électriques et électroniques, fabrication de matériel électrique, fabrication de composants électroniques, services de transports.



69. Systèmes aériens automatisés

Description

Le développement de services effectués au moyen de petits véhicules aériens automatisés et autonomes repose sur la capacité de contrôle du vol de ces « drones » en environnement hostile et perturbé. Cette capacité passe par une maîtrise de l'aéromécanique de ces engins et des lois de contrôle associées, tout en prenant en compte l'intervention humaine possible d'un opérateur à un niveau qui reste à définir en fonction des véhicules et des applications considérés.

Les verrous au déploiement de cette technologie sont d'ordre :

- réglementaire : la circulation des véhicules aériens, quelle que soit leur taille, est étroitement encadrée. Les industriels et opérateurs potentiels d'un côté, les autorités de l'autre, attendent que l'autre partie prenne l'initiative ;
- technique : des points restent à améliorer comme la transmission des données, la discrétion des véhicules, la gestion des situations dégradées...

Enjeux, Impact

En autorisant le déplacement de charges utiles (capteurs, colis...) dans des véhicules dimensionnés au plus juste (et non pas dans des véhicules dimensionnés pour transporter un pilote en plus de la charge utile), cette technologie contribuera globalement à l'efficacité énergétique de l'activité humaine.

Sur le plan national et européen, elle contribuera à relever le défi de la compétitivité et de l'emploi. Certains experts affirment que le marché des drones apportera à l'industrie aéronautique une rupture comparable à celle de la téléphonie mobile pour l'industrie des télécommunications.

La France a pris du retard dans la technologie

des drones militaires de tailles moyenne et grande (où les systèmes israéliens et américains dominent). Elle ne doit pas manquer le marché des drones civils de « petite taille » très prometteur : le tissu industriel concerné est large. L'impact sur la compétitivité et l'emploi est attendu à l'horizon 2015.

Marché

Au-delà des applications militaires, le potentiel du drone civil est gigantesque, ses applications étant extrêmement nombreuses :

- surveillance de lieux sensibles, surveillance d'urgence (avalanches, incendies de forêt...), surveillance de cultures, du trafic routier, inspection des ouvrages d'art... ;
- intervention en milieux dangereux et/ou pollués, missions dangereuses... ;
- épandage agricole, largage de vivres en zone de conflit, transport de petits colis... ;
- télécommunications.

Le marché mondial des drones représentait 2,4 Md\$ en 2000 et devrait atteindre 5,6 Md\$ en 2007, puis dépasser 10 Md\$ en 2010. Ce sera alors un des secteurs les plus dynamiques de l'industrie aérospatiale, à condition bien sûr que la réglementation évolue dans le sens de leur intégration dans la circulation aérienne.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, optique, énergétique, mécanique des fluides, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux, informatique, automatique, traitement du signal, électronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, optique, analyse, mesure et contrôle, traitements de surface, procédés techniques, appareils agricoles et alimenta-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

tion, environnement - pollution, transports, spatial - armement.

■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Mer, sécurité et sûreté (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Gestion des risques et vulnérabilités des territoires, System@tic (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Onera, Insa (Strasbourg), Laboratoire d'automatique de Grenoble, Laboratoire des systèmes complexes (Evry).

Industriels : EADS, Safran, Thales, Dassault.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Alenia Aeronautica (Italie), IAI (Israel Aircraft Industries), Micropilot (Canada), Schiebel (Allemagne), General Atomics (États-Unis), Sikorsky (États-Unis), Yamaha (Japon).

Commentaires

Le marché des drones civils devrait connaître une véritable explosion dès lors que les premières règles de navigabilité verront le jour. En Europe, le programme Ucare vise à publier des recommandations pour établir ces réglementations à l'échelle européenne. Pour en savoir plus sur ce programme : www.euro-uvs.org.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; commerce de gros, intermédiaires ; commerce de détail ; services de transports ; postes et télécommunications ; services aux entreprises.



70. Positionnement et horodatage ultraprécis

Description

À partir de signaux émis par une (ou plusieurs) constellation de satellites, un récepteur effectue un calcul de triangulation qui permet de déduire la position de l'antenne. Reposant sur ce principe, le système militaire américain GPS est opérationnel et accessible au public depuis plusieurs années. Malgré le développement de nombreux équipements et services (chacun peut aujourd'hui acquérir un récepteur GPS pour quelques dizaines d'euros), les garanties de qualité et de continuité de service du GPS sont insuffisantes pour des applications critiques (par exemple, atterrissage de précision des avions). Dès 2005, le système Egnos (*European Geostationary Navigation Overlay Service* ou système européen de navigation par recouvrement géostationnaire) offre un service amélioré, en utilisant les signaux GPS et Glonass (système russe). Il se compose de plusieurs charges utiles de navigation installées sur des satellites en orbite géostationnaire et d'un réseau terrestre comprenant 34 stations de positionnement et quatre centres de contrôle. La constellation de satellites Galileo, opérationnelle à l'horizon 2010, proposera trois fonctionnalités, dont l'utilisation individuelle ou combinée ouvre un vaste champ d'applications. Il s'agit de positionnement 3D décimétrique, voire centimétrique, d'horodatage ultraprécis (niveau de performance d'une horloge atomique), d'interopérabilité avec les normes télécoms (GSM, UMTS...).

Les terminaux, qui reçoivent le signal émis par les satellites et le traitent pour donner à l'utilisateur une information utile, intègrent de nombreuses technologies électroniques, logicielles (traitement du signal, cartographie, guidage...) et des fonctions de télécommunication.

Enjeux, Impact

De par la multiplicité des applications envisageables, cette technologie répond à de nombreux enjeux socio-économiques : sécurité des personnes et des échanges, réduction de la consommation d'énergie (par l'optimisation des trajectoires des véhicules), mobilité des personnes handicapées, etc.

En outre, il ne paraît pas acceptable que l'Europe dépende durablement de systèmes et de normes américains pour des applications critiques.

Par ailleurs, selon des études réalisées pour la Commission européenne, Galileo devrait créer, à partir de 2007, quelque 140 000 emplois en Europe.

Marché

Le marché de services et d'équipements qui découlera de Galileo est estimé à environ 9 Md€ par an. Plus largement, la Commission européenne retient que les marchés et les applications mondiaux pour la navigation par satellite sont en très forte croissance, et pourraient représenter 140 Md€ de ventes à l'horizon 2015. Il y a donc une véritable opportunité à saisir pour les industriels et les prestataires de service pour conquérir des positions de choix sur ce vaste marché.

Au-delà de la constellation de satellites, déjà commandée, les marchés accessibles aux entreprises, dont les PME, sont essentiellement :

- le marché des terminaux (matériel, logiciel) ;
- le marché des services associés : aide au voyage, sécurité (*tracking...*), informations trafic...

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

Acteurs

■ **Disciplines scientifiques** : optique, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), astronomie, astrophysique, mécanique, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, économie et gestion, géographie et aménagement.

■ **Compétences technologiques** : composants électriques, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques, transports, spatial - armement.

■ **Pôles de compétitivité** : Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

■ **Liens avec (technologies)** : travaux d'infrastructures furtifs ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; systèmes aériens automatisés ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Les acteurs français impliqués dans les utilisations de l'espace sont notamment rassemblés au sein de l'association I-Space (www.i-space.fr). L'initiative Cecile (Centre d'expertise et de compétences industrielles pour le développement des applications de la localisation et de l'environnement utilisant les satellites) rassemble également des acteurs du secteur (polestar.corporate.online.fr/presentcecile.htm).

Centres de compétences : Cnes, IGN...

Industriels : EADS-Astrium, Esri France, Loxane, Metod Localisation, Mobiloc (Groupe TDF), Novacom Services, Saphymo, Sercel, Thales IS, Thales Navigation... Les industriels concernés sont aussi : les opérateurs de transports (Air France, SNCF...), les constructeurs et équipementiers de véhicules (Airbus, Alstom, PSA Peugeot Citroën, Renault...).

■ **Exemples d'acteurs dans le monde** : Avmap (Italie), Garmin (États-Unis), Navteq (États-Unis), Navman (Nouvelle-Zélande), Teletlas (Pays-Bas)...

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur ; captage, traitement et distribution d'eau ; bâtiment ; travaux publics ; commerce de gros, intermédiaires ; services de transports ; postes et télécommunications ; services aux entreprises ; voirie et gestion des déchets, services personnels et domestiques.



71. Gestion des flux de véhicules

Description

Avec l'intensification des échanges de biens et des déplacements de personnes, les parties prenantes aux systèmes de transports se trouvent confrontées aux problèmes complexes de l'utilisation de ressources limitées, les infrastructures de transport au sens large : routes, voies ferrées, voies navigables, espace aérien...

L'amélioration des méthodes et outils de gestion des flux de transport permettra d'apporter des solutions globales ou segmentées aux problèmes suivants (liste non exhaustive) :

- comment rendre plus attractifs les transports en commun en réduisant les temps de parcours ?
- comment résorber l'insupportable congestion des centres urbains et de leurs axes d'accès ?
- comment éviter de doubler ou d'élargir un axe routier ou autoroutier, pour des besoins de trafic croissants ?
- comment faire passer plus de trains en toute sécurité sur un axe ferroviaire donné ?
- quelles nouvelles organisation et exploitation de l'espace aérien faut-il mettre en place, pour faire face à l'augmentation du trafic ?

Cette technologie s'applique aux véhicules et aux « charges utiles » : marchandises, personnes, et permet d'optimiser le système en fonction d'un ensemble de critères (minimisation du temps de transport, réduction de la consommation de carburant, limitation des « ruptures de charge » ...).

La conception, puis le déploiement et l'exploitation des systèmes de gestion de flux de transports nécessitent :

- en amont, une approche résolument pluridisciplinaire à travers des analyses reposant sur les « sciences de l'homme » et permet-

tant d'identifier les besoins sociétaux et leur évolution probable, ainsi que l'utilité et l'acceptabilité des dispositifs envisagés par les acteurs (conducteurs, passagers...) et de proposer une organisation globale du système ;

- une bonne maîtrise de l'algorithmie (optimisation globale, gestion des trajectoires individuelles...) ;
- des briques technologiques de plus en plus performantes et miniaturisées (capteurs, composants électroniques, ordinateurs, communications sécurisées...) intégrées dans les dispositifs de gestion des flux de transports.

Enjeux, Impact

L'enjeu du développement des technologies de gestion des flux est tout simplement la durabilité des systèmes de transport. Les pouvoirs publics de la plupart des pays ont pris conscience de la gravité de la situation et des conséquences économiques et environnementales désastreuses des dysfonctionnements actuels.

Dans son Livre blanc sur les transports (2001) la Commission européenne retient que « la congestion fait courir le risque sérieux d'une perte de compétitivité de l'économie européenne ». Les impacts des congestions des systèmes de transport peuvent être en partie évalués à la lecture des éléments proposés par la Commission :

- 10 % du réseau routier européen serait quotidiennement affecté par des encombrements ;
- les retards dans le transport aérien engendreraient une surconsommation équivalente à environ 6 % de la consommation annuelle de carburant ;
- les coûts dus à la congestion du trafic rou-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

tier en Europe devraient atteindre 80 Md€ par an en 2010, soit environ 1 % du PIB communautaire.

Au niveau national, deux enjeux apparaissent. En premier lieu, l'attractivité de la France bénéficiera d'une meilleure performance de ses infrastructures de transport. Ensuite, plusieurs acteurs français sont très bien positionnés sur les marchés du transport, et verront leur compétitivité renforcée par la maîtrise de ces technologies.

Marché

Cette technologie s'applique à tous les modes de transport, avec des spécificités propres à chaque mode.

L'espace aérien possède naturellement trois dimensions ; pourtant son organisation est actuellement basée sur des « couloirs aériens » et des points de passage obligés qui créent des goulots d'étranglement et limitent son potentiel. Une meilleure gestion des flux aériens passe par une refonte profonde de cette organisation : unification du ciel européen, utilisation de l'ensemble de l'espace, effacement progressif des opérateurs humains (contrôleurs, pilotes) des opérations temps réel, modification des procédures d'approche et de décollage. Sur le plan technique, les communications directes des ordinateurs de contrôle aérien aux pilotes automatiques, l'utilisation plus poussée des systèmes de navigation satellitaires, sont quelques axes de travail.

Dans le domaine ferroviaire, il s'agit de densifier l'utilisation des infrastructures, pour désengorger les axes routiers. Sur le plan européen, l'avènement de liaisons transeuropéennes bute sur la question de l'intermodalité.

Les routes sont aujourd'hui perçues comme un espace de liberté pour les conducteurs. Cette liberté « coûte » 5 000 morts en France, et la congestion récurrente de nombreux axes routiers et autoroutiers. La gestion des flux de véhicules routiers est limitée à des informations et des recommandations (radio, panneaux à messages variables) que le conducteur est libre de ne pas suivre. La gestion des flux de véhicules routiers passera par un véritable « contrôle-commande » entre l'infrastructure routière (ou un centre de contrôle) et les véhicules.

L'intermodalité, aujourd'hui handicapée par les « ruptures de charge » inhérentes à chaque changement de mode de transport, bénéficiera également des technologies de gestion des flux.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : neurosciences, optique, génie civil, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, optronique, mathématiques et leurs applications, sciences du langage, psychologie, sociologie, démographie, géographie et aménagement.

■ Compétences technologiques : composants électriques, audiovisuel, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, transports, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Génie civil ouest (Pays de la Loire), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Ville et mobilité (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Logistique Seine Normandie (Haute-Normandie)

■ Liens avec (technologies) : infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; ingénierie des systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - www.predit.prd.fr).

Centres de compétences : ENPC, Inrets, LCPC, RFF, Service technique de l'aviation civile, université de Marne-la-Vallée.

Industriels : Air France, Citilog, Connex, Dynalogic, Egis/Isis, Eurodécision, IER, Infotrafic, Médiamobile, RATP, SNCF, groupe Snef.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : les opérateurs de transport et de livraison, les industriels des technologies de génie civil, les grandes métropoles... sont concernés

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques ; travaux publics ; services de transports ; services informatiques.

par le développement et la mise en œuvre de ces technologies.

Commentaires

Les problématiques de gestion des flux de véhicules doivent s'appréhender à différents niveaux : local, régional, national et européen. Sur ce dernier point, les enjeux sont, en particulier, de disposer d'une taille critique suffisante pour s'affirmer sur la scène mon-

diale (transport aérien, Galileo...), de supprimer les goulets d'étranglements aux frontières et d'assurer l'interopérabilité des réseaux (notamment ferroviaires).

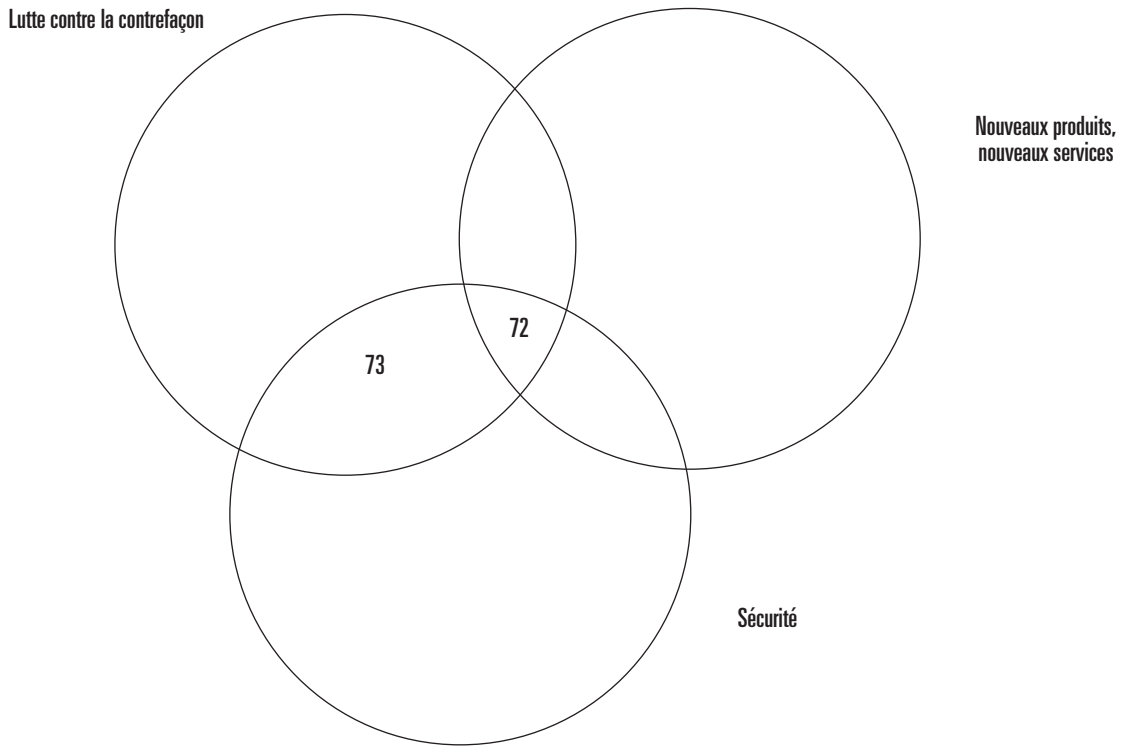
La coopération franco-allemande *Deufrako* (www.deufrako.org) est un exemple de mise en commun de compétences et de prise en compte de problématiques transnationales sur les transports.



Distribution - Consommation

- 72 Technologies d'authentification
- 73 Traçabilité

Des grands enjeux aux technologies clés



Le secteur de la distribution et de la consommation

Le contexte

Le secteur de la distribution et de la consommation correspond à ce que l'on peut appeler plus généralement les fonctions supports. Ce secteur recouvre plusieurs types d'activités dont quelques-uns sont présentés ci-après.

Banque, assurance et services financiers

Les services financiers produisent près de 7 % de la valeur ajoutée totale des économies européennes. Ils emploient 3,4 millions de personnes dans l'UE15. L'Allemagne compte pour 24 % de cette valeur ajoutée, le Royaume-Uni pour 17 % et la France et l'Italie pour 15 % chacune.

Le secteur de l'assurance a été ébranlé par les attentats et les catastrophes naturelles au début des années 2000. Il emploie 1,2 million de personnes dans

l'UE15. C'est au Royaume-Uni qu'il y a le plus d'entreprises d'assurance-vie (46 % du marché européen), et en Allemagne pour les autres types d'assurance (35 % du marché européen). Les assureurs « mixtes » sont très nombreux en Espagne et en France (36 % de ce marché), et les réassureurs au Luxembourg.

Dans le domaine de l'assurance, la France est un marché atypique puisque les mutuelles d'assurance sont dominantes. Par ailleurs les fonds de pension privés y sont moins développés qu'au Royaume-Uni, par exemple.

Les métiers de la banque et de l'assu-

rance correspondent à trois types de risques liés à la personne, aux activités économiques, aux biens. Une des caractéristiques du secteur de la banque-assurance est que les flux monétaires, d'informations et de matières, qui sont séparés dans l'industrie, sont confondus. Une banque de grande taille engage généralement 10 % de son CA en dépenses technologiques (matériel informatique, licences, services IT...). L'informatique est pour une banque ce que la chaîne de production est pour un constructeur automobile. Dans la banque, le cycle des technologies utilisées est d'environ cinq ans (c'est, par exemple, le temps de renouvellement du parc de cartes de crédit).

Enjeux et tendances dans les domaines de la banque, de l'assurance et des services financiers

Ces secteurs ont connu de très importants mouvements de concentration dans les dernières années, qui ne sont probablement pas encore achevés.

Les produits financiers destinés aux particuliers ou aux entreprises se sont multipliés ces dernières années. Les marchés financiers européens sont encore très fragmentés, leur intégration fait l'objet de plusieurs mesures de la Commission européenne. Cette intégration est rendue indispensable par le développement du commerce électronique. La banque en ligne (par téléphone ou Internet) représente désormais 10 % des transactions. Le nombre d'agences diminue, tandis que les distributeurs automatiques d'argent se multiplient.

Les banques subissent la concurrence des marchés financiers. Le vieillissement de la population et les incertitudes pesant sur le financement des retraites futures jouent en faveur du développement des fonds de pension. On estime

qu'un quart de la population active européenne est couverte par une retraite complémentaire.

Le secteur financier allie deux visions du monde, le global et l'hyper-local :

- rien n'est plus facile à transférer d'un bout à l'autre de la planète que l'argent ;
 - rien n'est moins délocalisable que le service financier de base (en particulier pour des raisons juridiques et fiscales).
- Pour le secteur financier, le microcrédit et le microfinancement ne sont pas des activités clés dans la mesure où, aujourd'hui, les coûts de gestion sont trop élevés pour que les opérations soient rentables. Chez certains acteurs, ce sont des retraités qui étudient les dossiers. Cela peut freiner le développement des projets de microentreprises. Des avancées technologiques (comme le traitement automatisé) pourraient permettre, peut-être, de rentabiliser ces activités.

Pour le secteur financier, un enjeu stratégique réside dans la gestion des systèmes de sécurité, en particulier des sauvegardes et de l'organisation de « sites de repli » (qui reprennent les activités d'un site indisponible en mettant un ordre de priorité sur les activités critiques). Dans le même registre, la sécurité des échanges d'information est essentiel : il faut répondre aux « vols d'identité » et améliorer toujours la cryptographie.

Dans le domaine bancaire, les exigences de sécurité se déclinent comme suit :

- la disponibilité de la ressource ;
- la confidentialité de la transaction ;
- l'intégrité de la transaction ;
- le contrôle et la preuve de la ressource et de la transaction.

Tout l'essor du commerce électronique dépendra du développement de procédures sûres de non-répudiation des transactions électroniques. Aujourd'hui,

dans un échange entre un portail sécurisé et un navigateur web, il n'y a pas de certification permettant le « rejeu »⁽¹⁾ de la transaction.

À plus long terme, un enjeu risque de devenir majeur pour le secteur, celui de la caractérisation génétique des individus pour la sélection des risques. Si ces technologies sont disponibles, les banques et les assurances pourraient être tentées de l'utiliser. Ces méthodes donneraient un avantage compétitif fort, mais on doit s'interroger sur la dimension éthique et le choix de société que cela implique, et donc sur les aspects législatifs associés.

Enfin, dans ce secteur, l'environnement fiscal, le droit du travail et la protection du consommateur sont des enjeux très structurants.

Conseil et études en R&D externalisée, ingénierie et architecture

En 2001, la valeur ajoutée du secteur de la R&D externalisée était de 11,9 Md€ au niveau européen. Le Royaume-Uni en génère 3,8 Md€, la France, en seconde position, 1,7 Md€. À la même date, ce secteur employait plus de 300 000 personnes dans l'UE 15 (dont environ 30 000 en France).

Toujours en 2001, le secteur des « activités d'ingénierie, d'architecture de test et d'analyse » représentait, quant à lui, près d'un cinquième de la valeur ajoutée de toutes les « fonctions support », avec un montant de 101 Md€ pour l'UE 25 et de 98 Md€ pour l'UE 15. L'Allemagne et le Royaume-Uni sont les pays qui contribuent le plus à cette activité avec une valeur générée à peu près équivalente

(1) Les attaques par « rejeu » sont des attaques consistant à intercepter des paquets de données et à les rejouer, c'est-à-dire les retransmettre tels quels au serveur destinataire. Ainsi, selon le contexte, le pirate peut bénéficier des droits de l'utilisateur.

d'environ 25 Md€, tandis que celle générée par la France, en troisième position européenne, est de 13 Md€. 2,4 millions de personnes sont employées dans ce secteur pour l'UE 25 et 2 millions dans l'UE 15. La croissance de la valeur ajoutée dans ce secteur est particulièrement forte et ininterrompue depuis 1997. Les clients sont principalement les entreprises.

Les frontières entre ces deux rubriques statistiques sont en réalité assez floues. Le premier groupe européen dans cette activité est français (Altran), mais les pays du nord de l'Europe ont quelques « champions » : WS Atkins (Royaume-Uni), Arup Group (Royaume-Uni), Arcadis Group (Pays-Bas), Fugro NV (Pays-Bas).

Enjeux et tendances dans les domaines du conseil et études en R&D, de l'ingénierie et de l'architecture

La complexité croissante des produits et processus de production, plus généralement l'évolution des économies occidentales vers des « économies fondées sur la connaissance », devrait contribuer à la croissance de ce secteur sur des sujets de plus en plus spécifiques. La sous-traitance d'ingénierie ou de R&D doit prendre en compte, au-delà des aspects purement techniques, les enjeux de propriété intellectuelle.

En France, la croissance de ce secteur peut se heurter, dans certains domaines, à la concurrence des laboratoires publics de recherche qui doivent se mettre en quête de contrats privés pour financer une partie de leur fonctionnement mais ne facturent pas systématiquement leurs coûts complets. Cette concurrence reste, cependant, peu importante. Le point faible de la France en la matière est l'insuffisance du transfert de technologies entre les laboratoi-

res académiques et le tissu industriel. Depuis plusieurs années, ce point a largement été abordé par de nombreux experts, et dernièrement dans les résultats de l'opération FutuRis.

Les activités de recherche-développement commencent aussi à être délocalisées. Les enjeux « technologiques » dans ce domaine d'activité sont en général liés à la créativité et à la production de connaissance, ainsi les outils informatiques de recherche « intelligente », de mise en réseau et de base de données sont de première importance. La gestion des systèmes complexes et la capacité d'intégration peuvent être des avantages compétitifs importants.

Services de sécurité

La valeur ajoutée des services de sécurité européens est estimée à 16,7 Md€ en 2001. Le Royaume-Uni arrivait en tête avec une VA de 4,3 Md€, suivi par la France (3 Md€) et l'Italie (1,8 Md€). L'emploi dans l'UE 25 était de 869 000 personnes, dont 647 000 dans l'UE 15. En France, le nombre d'employés du secteur de la sécurité privée est proche de celui des agents publics de police⁽²⁾.

Enjeux et tendances dans le domaine des services de sécurité

Il faut tout d'abord souligner que l'expression de marché privé de la sécurité recouvre de plus en plus de missions différentes : surveillance humaine et électronique, contrôle des accès et obstacle à l'intrusion, investigation, transport de fonds, protection des expatriés, etc.

Depuis le 11 septembre 2001, les

dépenses privées de sécurité ont très fortement augmenté aux États-Unis. Elles étaient déjà évaluées à 40 Md\$ par an dans ce pays, en 1999. Selon certaines sources, le marché mondial de la protection contre le terrorisme serait de 100 Md€. Selon certains auteurs, le seul marché américain de la sécurité privée - au sens large - pourrait atteindre ce chiffre dès 2008. Le dynamisme des technologies de sécurité est manifeste dans trois secteurs :

- les systèmes d'alarme et de détection (détecteurs à infrarouge, à micro-ondes, à ultrasons, détecteurs de métaux, détecteurs électromagnétiques, étiquettes électroniques, détecteurs de drogues, centrales d'alarmes) ;
- les systèmes de télésurveillance (TVCF, caméras de surveillance, vidéo-surveillance, caméras cachées, centrales de surveillance) ;
- les systèmes de contrôle d'accès (identification par cartes magnétiques, cartes à puces, cartes de proximité, centrales de contrôle d'accès). L'évolution la plus remarquable du secteur est l'intégration de plus en plus poussée des équipements variés grâce aux technologies de la communication, de l'électronique et de l'informatique. Globalement, un enjeu important à ce sujet est lié aux aspects normatifs et aux standards.

La mondialisation pose le problème de la généralisation de la contrefaçon, qui ne concerne plus seulement les produits de mode mais tous les biens industriels, avec reproduction des marques et des systèmes d'authentification (les faux arrivent à être aussi bons que les vrais, voire meilleurs). Selon les chiffres disponibles - même s'ils sont sujets à caution - la contrefaçon représenterait 10 % du commerce international (contre 5 % en 2000). Dans cette problématique, il faut garder à l'esprit que traçabilité et authentification sont deux problè-

(2) Aux États-Unis, le ratio est de huit agents privés pour un policier public. Un quart du marché privé de la sécurité provient de la commande publique.

mes différents : dans le premier cas, des technologies simples et surtout peu coûteuses sont essentielles. Dans le deuxième cas, c'est la sécurité et la fiabilité qui sont primordiales.

On ne peut pas omettre, dans les activités liées à la sécurité, d'évoquer les techniques d'identification et d'authentification (cartes à puces et biométrie). Il semble peu probable de voir à court terme la concentration de tous les services en une seule carte. On peut même envisager de ne jamais avoir besoin de cette carte unique : au Japon, il sera très prochainement possible de régler des achats ou un stationnement avec son téléphone portable. À moyen terme, les caractéristiques biométriques permettront d'identifier un individu de manière univoque : les caractéristiques physiques serviront alors de clé d'accès (a priori) non falsifiable à un ensemble de bases de données (comptes bancaires, droits d'accès...).

Services de recrutement et de travail temporaire

Ce secteur dégage une valeur ajoutée de l'ordre de 70 Md€ dans l'UE 25, en augmentation soutenue depuis plusieurs années (en 2001, Royaume-Uni 20 Md€, France, 20 Md€), et emploi 2,6 millions de personnes dans l'UE 25.

Enjeux et tendances dans le domaine des services de recrutement et de travail temporaire

L'activité des services de recrutement et de travail temporaire a fortement augmenté du fait de la tendance à l'externalisation et de la demande de flexibilité des entreprises. L'intérim est souvent considéré comme la première étape avant l'embauche définitive. L'enjeu dans ce domaine est de mettre en rela-

tion la personne disponible avec les compétences requises et l'employeur. Ainsi, les systèmes d'information jouent un rôle de plus en plus important dans ce secteur en élargissant la zone géographique de prospection.

Le vieillissement démographique nous pousse à souligner qu'il convient de s'interroger sur le rôle des « seniors » dans la compétitivité, d'autant que les industries ont besoin d'un support en compétences. Un nouveau modèle d'organisation sociale est nécessaire : formation tout au long de la vie, missions temporaires confiées à des seniors, tout cela peut conduire rapidement à une réingénierie complète de la fonction RH (gestion des carrières).

En résumé, la fonction RH est une activité clé pour :

- la gestion des compétences, en particulier par l'utilisation de l'expérience des plus âgés ;
- la formation tout au long de la vie ;
- et plus généralement, l'amélioration de l'employabilité de la population.

Par ailleurs, cette fonction aura, peut-être, à traiter de la question du malaise et du mal-être croissant en entreprise. Le développement de la microentreprise et de l'entreprise en réseau peut faire partie des solutions. Le développement des services à domicile peut, quant à lui, permettre de créer de nombreux emplois.

Conseil (juridique, management, financier) et services comptables

La valeur ajoutée du secteur du conseil (juridique, management, financier) et des services comptables représente près de 220 Md€ dans l'UE 25 et l'emploi, 4 millions de personnes. Le Royaume-Uni, avec 60 Md€, représente 28 % de la VA européenne, suivi

par l'Italie (26,7 Md€) et la France (26,6 Md€). Plus de la moitié de la VA est réalisée par des petites et moyennes entreprises. Les enquêtes d'opinion et les études de marché représentent une valeur ajoutée de 7 Md€ dans l'UE 25 et emploient près de 200 000 personnes.

Les enjeux et les tendances dans les domaines du conseil et des services comptables

L'externalisation des services comptables est un mouvement de fond qui n'est peut-être pas terminé. De plus, la fonction comptable peut être en partie automatisée par les systèmes d'information (*workflows*). La délocalisation vers des pays à bas coût touche également ces services.

Commerce de gros et de détail

La valeur ajoutée se monte à 420 Md€ dans l'UE 25 et l'emploi à 9 M€. Le Royaume-Uni dégage une VA de 85 Md€, l'Allemagne de 72 Md€, et la France de 56 Md€. Les petites et moyennes entreprises représentent plus de la moitié de la VA européenne du secteur.

Intermédiaires entre les producteurs et les distributeurs, les grossistes sont soumis à une forte concurrence et doivent proposer des services de plus en plus sophistiqués, en utilisant par exemple l'échange de données électroniques avec leurs partenaires pour gérer les stocks (traçabilité...). De plus, les producteurs peuvent être tentés de vendre directement au consommateur : cette tendance est renforcée par l'essor du commerce électronique. L'efficacité logistique, d'une manière générale, est un enjeu majeur du secteur commercial.

Les enjeux et les tendances d'évolution dans le domaine du commerce de gros et de détail

Qu'il s'agisse du commerce de gros ou de détail, les enjeux peuvent se résumer en trois points :

- efficacité logistique ;
- traçabilité des produits ;
- authentification des produits.

L'adoption des nouvelles technologies permettra de contrôler automatiquement les stocks et les commandes et de répondre plus rapidement aux changements de préférences des consommateurs.

Dans ce domaine, le développement de technologie comme celle des puces RFID pourrait avoir des conséquences importantes. Rappelons que la technologie RFID (identification par radiofréquence) permet d'utiliser des étiquettes - ou « tags » - de petite taille pouvant être lues à distance par un détecteur, et donnant une identification (comme une sorte de code barre radio). L'étiquette est en fait une puce associée à une antenne, faisant office de transpondeur, qui envoie un code numérique stocké dans sa mémoire quand le signal radio du lecteur lui fournit l'énergie et le signal nécessaires. La première application a été de les implanter sur des objets à des fins d'inventaire pour une reconnaissance à distance (quelques dizaines de mètres) de ces objets, y compris par cargaison entière. Les spécialistes estiment généralement que le secteur économique où cette technologie est la plus mature est celui du suivi des produits le

long de la chaîne de production-distribution.

D'autres systèmes technologiques pourraient permettre une traçabilité plus fine pour les produits périssables (changement de couleur en cas de rupture dans la chaîne du froid, par exemple, ou en fonction du temps de stockage). Wal-Mart a équipé un de ses magasins aux États-Unis d'un système pilote qui permet aux chercheurs de Procter & Gamble de voir et suivre les clientes des cosmétiques du groupe via des lecteurs RFID cachés qui mettent en route des caméras de surveillance du magasin quand le produit de la marque est sorti du rayon. L'enseigne a demandé à ses 100 premiers fournisseurs de lui livrer leurs produits « tagués » à partir du 1^{er} janvier 2005.

Soulignons que si le RFID marche bien pour la logistique, il ne remplacera pas immédiatement les 500 milliards de codes barres en circulation. Le leader mondial des machines fabriquant les tags RFID est allemand (Mühlbauer AG). En France, le potentiel industriel réside plutôt du côté des « encarteurs » (Gemplus, Axalto - ex-Schlumberger Smart Cards...).

Le commerce électronique bouleverse également le secteur. Pour certains produits, les livres notamment, il devient courant. Cependant, le commerce électronique ne remplacera jamais totalement le commerce classique : dans beaucoup de cas, le problème de la livraison reste entier (horaires, fiabilité, sécurité...).

La « rurbanisation » et le mitage territorial modifient le rapport des consommateurs au commerce. Ainsi, le modèle français de l'hypermarché subit aujourd'hui une crise : certains experts prédisent sa disparition inéluctable à plus ou moins brève échéance. Selon ces experts, ce modèle économique serait plus un « accident de l'histoire » qu'un modèle d'avenir. À l'étranger son échec est relativement patent, et, en France, sa santé actuelle ne tient qu'à un environnement législatif et réglementaire favorable. Parmi les raisons de cet « essoufflement », la réduction de la taille moyenne des foyers ne rend pas nécessaire le modèle de « courses » en grandes quantités (chariots de 300 litres et plus). À cela s'ajoute le fait que le vieillissement de la population ne milite pas en faveur de grandes surfaces « intimidantes » et impersonnelles.

Le commerce de centre-ville compte pour 25 à 30 % du PIB du commerce en général. Il faut s'interroger sur les moyens pour les acheteurs de ramener leurs achats chez eux, notamment si l'on réduit l'utilisation des voitures particulières en centre-ville. Généralement, les transports en commun sont inadaptés au transport de marchandises, même de volumes réduits.

Parmi les évolutions possibles, il faut noter l'utilisation du téléphone portable qui pourrait devenir rapidement un véritable « outil commercial » : achat électronique, authentification, photographie de produits, comparaison de prix, publicité avec des géo-tags.

Distribution - Consommation



72. Technologies d'authentification

Description

Les technologies d'authentification permettent de lutter contre la contrefaçon des objets et la falsification des documents. Elles permettent également la reconnaissance des organismes vivants. Ces technologies sont complémentaires des technologies de traçabilité, telles que code barre, datamatrix, RFID (*Radio Frequency IDentification*) ... qui ne peuvent pas prétendre authentifier un produit.

La preuve de l'authenticité d'un produit vendu sous une marque ou un label ne peut être apportée que par une pièce probante ou un traceur intimement rattaché au produit et associé à la marque et à l'identifiant qui l'accompagne. Cet élément probant doit être incontestable. Il faut donc que l'homme, en tant qu'acteur potentiel de la contrefaçon, soit exclu du processus qui conduit à l'élaboration de cette preuve et en plus soit incapable de reproduire une telle preuve à l'identique. Les technologies d'authentification doivent concilier impossibilité pratique de reproduction et faisabilité de la mesure des caractéristiques.

On distingue deux grandes familles de technologies d'authentification :

- celles reposant sur des techniques d'analyse permettant d'accéder aux caractéristiques intrinsèques de l'objet ou de l'être vivant : techniques isotopiques (mesurant la quantité d'un isotope naturellement présent), biologie moléculaire, cristallographie, chromatographie en phase liquide ou gazeuse, spectroscopies (absorption atomique, ultraviolet...), fluorescence, etc. Certaines de ces techniques sont anciennes, mais la plupart sont en perpétuelle évolution, et les associations de ces techniques entre elles permettent d'aller de plus en plus loin

dans la finesse de l'analyse. À ces techniques se combinent celles permettant de remonter à la « signature » unique dans le cas des organismes vivants, le génome. Citons l'amplification génétique, permettant de recopier un fragment d'ADN grâce à une enzyme ou les techniques de criblage et de synthèse à haut débit ;

- les techniques de biométrie permettent également d'accéder à certaines caractéristiques intrinsèques de l'individu (alors que les papiers d'identité peuvent être volés ou falsifiés) : les empreintes digitales (connues depuis longtemps), la reconnaissance de formes d'organes caractéristiques (oreilles, mains, face), la cartographie thermique, la reconnaissance vocale ou olfactive, la reconnaissance de l'iris ou de la rétine sont envisagées à plus ou moins longue échéance.

Les technologies de marquage issues d'un processus chaotique paraissent également bien adaptées. Par exemple, le « code à bulles » (bulles autogénérées dans un polymère transparent) dont la signature est toujours unique (probabilité de reproduction 10-80) et n'est pas décidée par l'homme mais par un processus naturel. Associé à une base de données locale et/ou distante, le « code à bulles » est accessible à l'homme uniquement en lecture mais impossible en écriture.

Enjeux, Impact

La contrefaçon représenterait plus de 10 % du commerce mondial. Elle croît dix fois plus vite que les échanges internationaux, détruit des centaines de milliers d'emploi, et est à l'origine de dizaines de milliers de morts (faux médicaments, alcools frelatés, fausses pièces d'origine électrique, automobiles, aéronautiques). Elle devient la première industrie mondiale et touche tous les sec-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Distribution - Consommation

teurs d'activité. Si les contrefaçons diffusées sur le sol français et européen sont certes en augmentation modérée, il en est autrement des mêmes produits diffusés en Europe de l'Est, en Chine, en Afrique où ils représentent une part importante de l'économie. À une époque où les marchés de nos industries vont se situer de plus en plus à l'exportation vers ces pays, on mesure, à l'avance, les conséquences économiques désastreuses que ceci aura.

À un tel niveau, la contrefaçon n'est plus occasionnelle et ne touche pas que les produits de luxe. Elle s'adresse désormais à la production de masse et aux produits les plus complexes. Pour accéder aux marchés, les produits contrefaits doivent aussi satisfaire à des caractéristiques comparables à ceux des originaux (ordinateurs, téléphones portables, etc.). Nous passons progressivement d'une époque où la contrefaçon n'était qu'une pâle copie (en général vendue moins chère pour trouver acquéreur) qui tendait plutôt à « imiter » ou à « leurrer » un original en reprenant des parties de marques ou des appellations similaires, à une période où la contrefaçon doit être le plus possible parfaite et où il devient quasiment impossible de distinguer le vrai du faux. Il est même à prévoir que l'accélération de la mondialisation des échanges, avec l'externalisation et la délocalisation des centres de production, pourrait conduire à transformer les sous-traitants d'aujourd'hui en contrefacteurs de demain.

Les technologies d'identification permettent aussi de répondre aux exigences réglementaires. Elles doivent donc s'inscrire dans la chaîne de traçabilité pour répondre aux exigences accrues des consommateurs et des règlements européens (notamment 178/2002).

Marché

La demande du marché émane de trois types de donneurs d'ordres :

- le consommateur qui veut avoir les moyens de vérifier l'authenticité de ses achats : l'authentifiant permet au consommateur de vérifier lui-même l'authenticité du produit et d'avoir confiance dans l'utilisation des produits de consommation ;
- l'industriel, pour qui la contrefaçon est une concurrence déloyale. L'authentifiant étant

unique, il confère aux objets et aux documents une unicité incontestable permettant de remonter à l'origine de ceux-ci et d'en déduire leur histoire. L'authentifiant peut s'utiliser pour sécuriser les transports, comme une partie d'un système de scellés. Le scellé, dont la propriété essentielle est de ne pas être réutilisable, et l'authentifiant associé non reproductible permettent de sécuriser la fermeture des conteneurs en prouvant leur ouverture illicite. L'authentifiant étant un objet unique et non reproductible, il peut constituer une preuve tangible ;

- les États, dans leur mission de lutte contre les trafics, crimes et délits qui souhaitent :
 - assurer l'authentification et le contrôle des biens et des personnes ;
 - assurer la gestion et le contrôle des identités et des droits ;
 - contrôler, tracer et authentifier les informations ;
 - réduire les revenus des trafics des organisations criminelles.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, matériaux, optique, physique des constituants élémentaires, physique des milieux dilués, physique des milieux denses, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, droit et sciences politiques.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, optique, chimie organique, traitements de surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques, imprimerie, procédés thermiques.

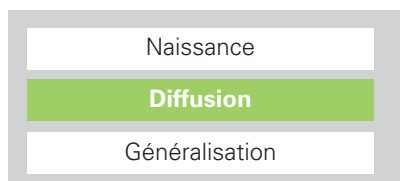
■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), Minalogic (Rhône-Alpes), Prod'innov (Aquitaine), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

■ Liens avec (technologies) : techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; traçabilité.

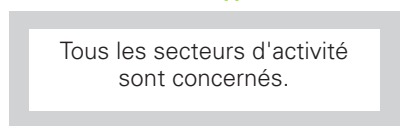
■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inra, Inria.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Industriels : Arjo Wiggins, Hologram Industrie, Eurofins, ProofTag, Sicpa, Ecocert.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Authenix (États-Unis), Kurz (Allemagne), AOT (Royaume-Uni), IHMA (*International Hologram Manufacturers Association* - ihma.org),

...

Commentaires

La France est bien positionnée dans ce domaine, tant au niveau académique (Inra de Clermont-Ferrand notamment) qu'au niveau industriel (Ecocert est un leader européen du contrôle et de la certification pour les produits issus de l'agriculture biologique ; Eurofins est un leader mondial des analyses biologiques pour l'authentification). Dans ce domaine, les efforts de recherche sont à poursuivre.

Distribution - Consommation



73. Traçabilité

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

D'après la norme Iso 8402, la traçabilité est l'aptitude à retrouver l'historique ou la localisation d'un article ou d'une activité [...] au moyen d'une identification enregistrée. Il s'agit de pouvoir localiser un objet ou composant à tout moment du processus de production ou de distribution, et de pouvoir a posteriori reconstruire le parcours de chaque objet ou de chacun de ses composants les plus importants.

Dans les secteurs alimentaires et pharmaceutiques, la traçabilité est obligatoire réglementairement. Elle se développe pour des raisons de maîtrise de la qualité et de la chaîne logistique dans des domaines industriels tels que l'automobile, l'aéronautique, le textile et, d'une manière plus générale, les industries manufacturières.

Pour les industriels, les motivations sont d'ordre réglementaire mais aussi commercial. Suite aux différentes crises (dans le domaine alimentaire notamment : ESB, listéria...), la demande de la part des consommateurs en terme de traçabilité est de plus en plus forte. Elle est à mettre en relation avec leur quête d'authenticité. La mise en place de la traçabilité alimentaire permet de valoriser des produits de niche (produits biologiques, produits « terroir », produits garantis sans OGM, sans allergène). Dans ce domaine, la France est susceptible d'apporter une « dotation culturelle » riche.

Par ailleurs, la traçabilité permet, au-delà du lien de confiance établi avec le consommateur, de valoriser la chaîne de production et de distribution du produit. Elle apporte de la valeur ajoutée au produit.

Enfin, la traçabilité est devenue un élément clé de la gestion de la chaîne logistique, de la production à la distribution, et du suivi de la

qualité des objets industriels.

Les moyens techniques mis en place pour satisfaire les exigences réglementaires dans ce domaine sont variés :

- mise en place d'un étiquetage pertinent ;
- technologies RFID (pour « identification par radiofréquence ») ;
- systèmes de mesure ;
- techniques de marquage moléculaire ;
- techniques de marquage biologique ;
- marquage issu d'un processus chaotique.

Les technologies de gestion de base de données (relationnelles, distribuées) sont un des éléments clés à maîtriser pour résoudre les problèmes de traçabilité. L'ensemble de ces techniques a vu le jour suite aux progrès concomitants de plusieurs disciplines : la génomique, la microélectronique, les mathématiques, l'informatique. Les recherches sont à poursuivre pour trouver une réponse technique adaptée à chaque type de produit.

Enjeux, Impact

La traçabilité doit répondre aux exigences accrues des consommateurs et des règlements européens. Les enjeux de la maîtrise de cette technologie sont de trois ordres :

- il s'agit d'un réel élément de différenciation marketing car la demande d'informations de la part des consommateurs est très forte. Les données recueillies lors d'un sondage commandé par la Commission européenne et l'Office de lutte antifraudes (Olaf) illustrent ces propos : pour 46 % des personnes interrogées (56 % en France), la fraude et la tricherie mettant en jeu la sécurité alimentaire sont le 2^e sujet d'inquiétude. La diversification des origines des produits, résultant de la mondialisation des échanges, n'a fait qu'ajouter une source d'inquiétude supplémentaire, dans la mesure où se crée une cer-

Distribution - Consommation

taine « distance » avec l'origine du produit et où la contrefaçon se généralise dans tous les secteurs. Par ailleurs, la qualité et l'authenticité représentent 75 % des motivations d'achat des consommateurs français (Crédoc, Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie - 2003) ;

- il s'agit de répondre aux exigences réglementaires. Depuis le 1^{er} janvier 2005, la traçabilité des produits est obligatoire dans l'agroalimentaire (règlement 178/2202, applicable au niveau communautaire). Les industries agroalimentaires ont obligation d'investir dans de nouveaux processus pour favoriser la transparence et rendre l'information accessible ;
- il s'agit, enfin, de faciliter la gestion de la chaîne logistique (*supply chain*), afin de permettre d'une part un suivi strict de la qualité du produit, d'autre part une gestion fine des stocks de pièces détachées et sous-systèmes. Par ailleurs, en cas de défaillance d'un système ou de problème sanitaire, les industriels doivent pouvoir reconstruire le parcours complet de l'objet en question et de ses composants.

Marché

Le marché de la traçabilité est vaste. Les principaux secteurs d'application sont la pharmacie, l'agroalimentaire, l'automobile, l'aéronautique, le textile (lutte contre la contrefaçon).

Ce marché est en croissance, stimulé par les nouvelles réglementations, notamment dans le domaine alimentaire. 15 000 entreprises françaises sont concernées aujourd'hui et le dynamisme de ce marché est important : sa croissance est de 15 % par an.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie, chimie analytique, informatique, électronique, traitement du signal.

■ Compétences technologiques : télécommunications, informatique, optique, analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Aquatique (Nord-Pas-de-Calais), Vitagora (Bourgogne), Minalogic (Rhône-Alpes), Q@limed Agropolis (Languedoc-Roussillon).

■ Liens avec (technologies) : génomique fonctionnelle à grande échelle ; alimentation pour le bien-être et la santé ; contrôle des allergies alimentaires ; RFID et cartes sans contact ; positionnement et horodatage ultra-précis.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cemagref (Clermont-Ferrand), CTCPA (Centre technique de la conservation des produits agricoles), Inra (Clermont-Ferrand).

Industriels : Agreentech, Alcan Packaging, Ask, Ecocert, Eurofins, Gemalto, Génome Express, Inside, Philips, ST Microelectronics, Tetra Pak...

Pour en savoir plus : www.poletracabilite.com/default.cfm ; www.tracabilite.org

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Advanced ID (Canada), Sony (Japon), Texas Instruments (États-Unis)...

279

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

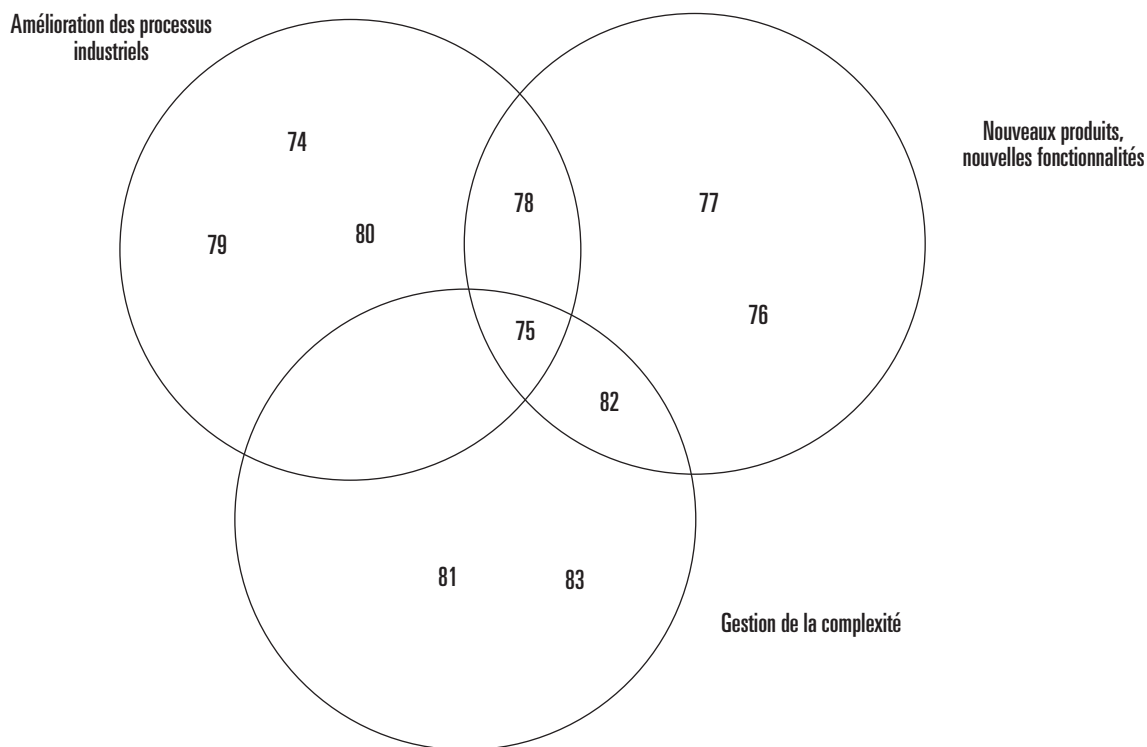
Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; habillement, cuir ; industrie pharmaceutique ; fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien ; industrie automobile ; construction aéronautique et spatiale ; industrie textile.



Technologies et méthodes de production

- 74 Contrôle de procédés par analyse d'image
- 75 Capteurs intelligents et traitement du signal
- 76 Assemblage multimatériaux
- 77 Micro et nanocomposants
- 78 Procédés et systèmes de photonique
- 79 Nouveaux procédés de traitement de surface
- 80 Procédés de mise en forme de matériaux innovants
- 81 Méthodes et outils de coconception
- 82 Ingénierie des systèmes complexes
- 83 Transfert de technologie

Des grands enjeux aux technologies clés



Le secteur des technologies et méthodes de production

Le contexte

Le secteur des équipements, process et méthodes de production est porteur d'enjeux majeurs pour la maintien et l'amélioration de la compétitivité et de l'activité des entreprises industrielles françaises. À l'heure où les coûts de main-d'œuvre sont un facteur d'attrac-

tivité pour les entreprises dans certains pays d'Europe de l'Est ou d'Asie, les atouts de l'industrie française résident d'une part dans les méthodes et outils permettant l'augmentation constante de la productivité, d'autre part dans ses capacités d'innovation et de production à haute valeur ajoutée.

Les domaines traités dans le cadre de cette monographie sont l'ensemble des secteurs de la productique, c'est-à-dire :

- l'instrumentation industrielle ;
- l'automatique ;
- les équipements électriques et électroniques ;
- les équipements de production (toutes industries) ;

- les procédés ;
- les méthodes d'amélioration de la productivité.

Par extension, la base de travail de l'étude étant la classification Eurostat, l'imagerie médicale et l'instrumentation médico-chirurgicale sont également abordées dans cette partie.

Les équipements, process et méthodes de production des différents secteurs d'activité ont en commun un certain nombre de déterminants détaillés dans cette section. Cependant, il est utile, à ce stade, d'exposer quelques données globales sur l'activité industrielle française.

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés ^(a) (milliers)	Entreprises ^(a) (variation ^(b))	Investissement ^(b)
Industries des biens de consommation	133,7	512,5	4 565 (- 4,3 %)	- 5,4 %
Industrie automobile	111,7	271,5	542 (- 0,9 %)	- 5,7 %
Industries des biens d'équipement	167,5	638,6	5 042 (- 3,2 %)	+ 1,2 %
Industries des biens intermédiaires	248,3	1 171,4	10 257 (- 2,9 %)	- 0,1 %
Ensemble de l'industrie (hors énergie)	631,2	2 593,9	20 406 (- 3,0 %)	- 2,0 %

(a) entreprises de 20 salariés et plus

(b) variation entre 2003 et 2004

Source : Chiffres clés des industries françaises (ensemble de l'industrie (hors énergie) - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

L'industrie française est constituée de plus de 20 000 entreprises de plus de vingt salariés, alors que le nombre des petites entreprises industrielles et de l'artisanat de production (PEIA, de 0 à 19 salariés) était estimé à 168 000 en 2001. Le secteur industriel, dans son ensemble, représente, en 2004, un chiffre d'affaires de 631 Md€.

Si le secteur industriel est une composante forte de l'activité et de l'emploi en

France, force est de constater, depuis plusieurs années, une tendance durable à la baisse des investissements industriels nécessaires au soutien de la croissance. Ce constat est en contradiction, depuis plusieurs années, avec les prévisions d'investissements affichées par les industriels. Les bénéfices réalisés par les grands groupes industriels servent en partie à assurer une croissance externe fondée sur l'acquisition de filia-

les hors du territoire français (26 Md€ au premier semestre 2005). Par ailleurs, les enquêtes de l'Insee révèlent que la plus grande partie des investissements industriels visent des gains de productivité et non un accroissement des capacités de production, qui sont globalement en sous-charge en 2005. Cette diminution de l'investissement a des conséquences immédiates sur le secteur des équipements industriels.

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés ^(a) (milliers)	Entreprises ^(a)
Machines de bureau et matériel informatique	13,5	26,4	65
Moteurs, génératrices et transformateurs électriques	3,7	22,1	161
Appareils d'émission et de transmission	14,0	45,3	156
Matériel d'imagerie médicale et de radiologie	1,2	2,8	11
Appareils médico-chirurgicaux	3,9	23,0	253
Équipement d'aide à la navigation	5,4	21,7	37
Instrumentation scientifique et technique	3,5	21,2	210
Équipement de contrôle des processus industriels	1,8	12,2	197
Total industries des équipements électriques et électroniques	47,0	174,9	1 089
Matériel électrique	22,0	115,5	565
Composants passifs et de condensateurs	2,6	6,5	77
Composants électroniques actifs	7,5	31,4	60
Assemblage de cartes électroniques pour compte de tiers	0,9	19,0	204
Total industries des composants électriques et électroniques	33,0	172,4	906
Total équipements et composants électriques et électroniques	80,0	347,3	1 997

(a) entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries françaises des équipements et composants électriques et électroniques - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés ^(a) (milliers)	Entreprises ^(a)
Éléments en métal pour la construction	5,7	36,9	609
Chaudronnerie, réservoirs métalliques, chaudières	7,3	56,0	882
Équipements mécaniques	12,9	60,0	652
Machines d'usage général	16,1	87,8	785
Machines agricoles	4,1	16,4	206
Machines-outils	1,8	11,0	159
Machine d'usage spécifique	9,3	50,6	627
Armes et munitions	2,6	11,8	17
Total équipements mécaniques	59,8	330,4	3 637

(a) entreprise de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries françaises des équipements mécaniques - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

Machines et équipements industriels

En Europe, le secteur des machines et équipements industriels représente une valeur ajoutée de 168 Md dans l'UE 25, soit près de 11 % de la valeur ajoutée industrielle. Il fournit des emplois à 3,6 millions de personnes. L'Allemagne domine le secteur en Europe avec plus du tiers de la valeur ajoutée créée (37,4 %), et plus de 50 % sur le seul segment des machines-outils. Cependant, on note que la production européenne de machines-outils diminue en moyenne de 1 % par an.

Le secteur des équipements industriels dédiés à la production est mal représenté dans l'industrie française. Ainsi, le secteur de la machine-outil n'est plus présent en France qu'avec 159 entreprises de plus de vingt salariés, la France se positionnant au dixième rang mondial et au quatrième européen (derrière l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni) avec 3 % de la production mondiale. Les entreprises nationales ont déserté le marché de la machine-outil standard au profit des entreprises japonaises et allemandes notamment, et se sont repositionnées sur le marché des machines spécifiques. Ce positionnement de niche leur permet de rester compétitives face à des pays à faible coût de main-d'œuvre en développant des produits à forte valeur ajoutée. Néanmoins, la taille relativement réduite des entreprises concernées ne les autorise pas à engager des sommes importantes en R&D.

Les principaux clients des entreprises européennes sont les États-Unis et la Chine, avec respectivement 10 % et 8 % des exportations.

Le rang des entreprises européennes est le même sur l'ensemble du secteur des équipements industriels (équipements électriques et de process), la

France étant en quatrième position pour la valeur ajoutée créée, derrière l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni. Le principal acteur français du secteur est Alstom.

Dans le secteur des machines agricoles, la France est au troisième rang européen derrière l'Allemagne et l'Italie. Les entreprises nationales exportent 50 % de leur production, principalement vers les pays de l'Union européenne (30 % de la production) - notamment l'Allemagne et l'Amérique du Nord (8 %). Ces marchés sont proches de la saturation. Les marchés en progression se situent en Europe de l'Est et en Russie principalement. La Chine est par ailleurs un importateur de machines agricoles, avec des importations évaluées à 4,2 Md\$ en 2004, contre 1,9 Md\$ en 2003. Les besoins de ce pays concernent essentiellement des machines de faible puissance en raison de la surface moyenne réduite des exploitations.

Équipements et machines électriques

Le secteur des équipements et machines électriques regroupe les générateurs, transformateurs, câbles électriques, fibres optiques, batteries, éclairage... Il représente une valeur ajoutée en Europe de 72 Md€ en 2001 (chiffres UE 25) et emploie environ 1,7 million de personnes. Dans ce secteur, l'Allemagne domine le marché avec 39 % de la valeur ajoutée. La France, l'Italie et le Royaume-Uni suivent avec environ 11 % de la valeur ajoutée créée chacun.

Les acteurs français, dont les représentants les plus importants sont des grands groupes internationaux tels Legrand ou Schneider Electric, positionnent la France au deuxième rang européen (un quart de la valeur ajoutée du secteur). Au total, le secteur français

des équipements et machines électriques génère un chiffre d'affaires global de l'ordre de 25,7 Md€ en 2004, pour 726 entreprises moyennes et grandes, représentant 138 000 salariés. Les trois quarts de la production sont destinés à l'exportation, essentiellement vers l'Union européenne, mais de plus en plus vers l'Asie.

La production d'équipements électriques en Europe a tendance à diminuer face à la concurrence des pays à faible coût de main-d'œuvre. Elle est fortement tributaire des capacités de production et des investissements industriels d'une part, du marché du bâtiment et des travaux publics d'autre part.

Instruments de mesure et optique de précision, instruments médicaux

Ce segment de l'analyse regroupe les instruments de mesure, qu'ils soient utilisés en contrôle de process industriel, en métrologie courante ou en environnement de recherche, les instruments d'optique de précision et l'instrumentation médicale. Dans les données statistiques, l'horlogerie est classiquement associée à cette catégorie. Il s'agit d'un secteur d'activité faible en France.

Dans son ensemble, ce segment représente une valeur ajoutée de 48 Md€ en 2001 dans l'UE 25 pour un effectif de 995 000 personnes. Le trio de tête des acteurs européens du domaine est composé de l'Allemagne avec un tiers de la valeur ajoutée, du Royaume-Uni (17,8 %) et de la France (16,1 %). Il s'agit d'un secteur relativement dynamique, tiré par l'innovation.

En 2004, les acteurs français génèrent un chiffre d'affaires estimé à 15,8 Md€, avec 81 000 salariés dans 708 moyennes ou grandes entreprises.

Dans le domaine spécifique de l'instrumentation médicale et des sciences du

vivant, les entreprises à capitaux français sont pour la plupart des PME de moins de 100 personnes. Les plus grandes entreprises installées sur le sol français sont des filiales de groupes étrangers, essentiellement américains, qui se partagent l'essentiel du marché mondial et les deux tiers du marché français.

La maîtrise des coûts de santé s'inscrit dans les politiques publiques françaises et européennes. Cette tendance va à l'encontre du développement de l'industrie de l'imagerie médicale et de l'instrumentation chirurgicale ; mais elle est contrebalancée par plusieurs phénomènes durables :

- le vieillissement de la population entraîne des besoins forts en moyens de diagnostic et de traitement. Ce fait de société offre à l'industrie pharmaceutique et aux acteurs de l'équipement médical un potentiel de développement important ;
- dans la même direction, la société occidentale considère de plus en plus la maladie comme un aléa inacceptable. La demande est donc forte en moyens de diagnostic comme de traitement ;
- selon la Commission européenne, la part des appareils médicaux dans les budgets de santé a dépassé, dans certains pays, celle des produits pharmaceutiques ;
- enfin, la demande des pays émergents en équipement médico-chirurgical est en forte croissance, offrant aux entreprises européennes de nouveaux débouchés commerciaux.

Dans le domaine des sciences du vivant, la France jouit d'un haut niveau de compétence académique à travers ses centres de recherche (Inserm, Inra, CNRS...) et les laboratoires universitaires liés aux hôpitaux. Par ailleurs, l'excellence est également reconnue dans les domaines des technologies nécessaires à l'observation du vivant et au

développement de l'instrumentation médico-chirurgicale (analyse d'images, laser, automatique, informatique).

Les enjeux du secteur

Les défis qui dictent les évolutions du secteur industriel, aussi bien en termes d'équipement que de méthodes de gestion et de production, découlent de l'évolution globale de la société. On peut dégager les grands enjeux suivants :

- sur le plan économique, le principal enjeu de l'industrie française et européenne est de faire face à la montée en puissance de la concurrence des pays à faible coût de main-d'œuvre pour la production de masse des biens de consommation. Des domaines tels que l'industrie textile, après avoir subi la concurrence des pays du Maghreb, affrontent la croissance de la puissance industrielle de la Chine. Des réorientations de l'activité vers des créneaux à plus forte valeur ajoutée s'avèrent nécessaires. Créneaux sur lesquels les capacités d'innovation de l'industrie et du monde académique français et européens constituent des atouts primordiaux. Faute d'adaptation de l'industrie aux mutations du marché, l'impact sur l'emploi salarié en France peut être fortement négatif. Notamment, l'industrie française doit tirer parti du caractère transversal de certaines technologies de production pour réaliser des économies d'échelle dans leur mise au point et leur mise en œuvre ;
- un des corollaires d'une croissance mondiale forte est l'augmentation de la demande en matières premières (dont le pétrole), induisant un accroissement des prix d'achat et donc un renchérissement des coûts de production. Les fluctuations monétaires, avec notamment un taux de change euro-dollar encore défavorable mi-2005, peuvent amplifier

ce phénomène et perturber la concurrence avec des pays producteurs dont la monnaie est alignée sur le dollar américain ;

- les préoccupations de la société pour la protection de l'environnement poussent à l'amélioration de la qualité des produits et à la diminution des externalités négatives de la production (déchets, consommation d'énergie, pollution). L'exigence de plus en plus importante du consommateur de disposer de produits « zéro défaut » et la réduction des temps de développement des produits imposent aux industriels de réviser leurs procédés de conception, de fabrication et de contrôle. Notamment, la traçabilité des produits et composants apparaît comme un enjeu majeur des systèmes de production modernes ;
- la société actuelle impose un rythme soutenu d'innovation. Le délai de mise sur le marché d'un produit à partir du début de sa conception est de plus en plus court ;
- la généralisation de l'utilisation de « systèmes complexes » rend nécessaire la mise au point de méthodes permettant de garantir la fiabilité et la sûreté de fonctionnement de ces systèmes. Cette évolution est d'autant plus forte que les pays européens, à la suite des États-Unis, se judiciarisent, faisant courir des risques financiers et pénaux aux industriels en cas de défaillance grave de ces systèmes ;
- le développement de la sous-traitance, de la cotraitance ou encore du concept « d'entreprise étendue » recèle des enjeux forts en termes d'organisation du travail. Cette évolution des relations client-fournisseur dans l'industrie impose des changements de méthodes de travail, de moyens et protocoles d'échanges d'informations, de critères de performance, de validation des travaux, etc. ;

- la sécurité au travail et la sûreté à long terme des conditions de travail font maintenant partie intégrante de la mise au point d'un procédé de production. Cet impératif est évidemment imposé par la réglementation. Améliorer l'ergonomie des équipements apparaît alors comme un enjeu en matière de santé : les chercheurs (INRS) mettent régulièrement en évidence des maladies professionnelles liées aux nouveaux types d'interfaces.

Dans les secteurs des sciences du vivant et du médical, l'enjeu est double :

- le premier est la réduction des dépenses de santé. Pour répondre à cet enjeu, les technologies qui permettent de diminuer la durée et le coût des hospitalisations sont de toute évidence des axes de développement durables dans le domaine des équipements médico-chirurgicaux ;
- le second est une qualité accrue du diagnostic, induisant un développement de nouvelles techniques d'analyse et de diagnostic. Les techniques d'imagerie et de diagnostic amènent également une connaissance approfondie du fonctionnement du vivant, avec des répercussions dans le domaine médical et les biotechnologies.

Les tendances d'évolution du secteur

En matière d'usages

Pour répondre aux grands enjeux décrits ci-dessus, l'industrie fait évoluer ses méthodes, ses pratiques et sa façon de concevoir ses produits et ses équipements.

De plus en plus, la production industrielle d'un objet ne repose plus sur une seule entreprise, mais sur un groupement plus ou moins lié d'entreprises de toutes tailles. Il existe une tendance lourde à l'externalisation des compéten-

ces qui ne font pas partie du cœur de métier de l'entreprise. La conception de certaines parties d'un objet industriel se trouve de fait confiée au fournisseur de rang 1 ou 2, selon des spécifications fonctionnelles précises émises par le donneur d'ordre. Ce changement de fonctionnement a pour conséquence d'imposer à « l'entreprise étendue », constituée par le donneur d'ordre et ses sous-traitants, certains principes de fonctionnement s'articulant autour de quatre types de communautés :

- une communauté de méthode : la conception et la planification des travaux de conception ou de production doivent s'appuyer sur un référentiel commun de méthodes pour l'analyse du besoin, la définition des actions ;
- une communauté de calendrier : les différents partenaires doivent s'entendre sur un plan de travail commun dans lequel ils peuvent tour à tour se trouver à un nœud du chemin critique de conception ou de fabrication du produit, toute défaillance entraînant alors des retards et des pertes financières ;
- une communauté d'outils : les partenaires doivent garantir le partage et l'échange de l'information technique ou liée à l'organisation du travail, la transmission et la traçabilité des composants et produits à échanger (logistique) ;
- une communauté de jugement : des critères communs d'appréciation de l'avancement et de la qualité du travail doivent être mis en place pour permettre ou faciliter la prise de décision dans un ensemble comportant des circuits variés. Un corollaire de ce changement est le report d'une partie du risque industriel du groupe donneur d'ordre vers les sous-traitants. Par ailleurs, ces changements ont des répercussions importantes en termes d'organisation du travail et des échanges.

La compétitivité des entreprises françai-

ses et d'Europe de l'Ouest passe par une maîtrise complète des coûts de production (productivité) et de conception. De nouvelles pratiques sont donc en train de s'imposer dans le processus de création des nouveaux produits :

- l'outil de production doit être le plus flexible possible. Dans la pratique, cela revient à disposer d'un outil permettant de faire varier rapidement, en générant un minimum de pertes, les caractéristiques du produit fabriqué : changer la couleur d'un composant plastique extrudé en cours de fabrication en est un exemple ;
- un autre aspect de cette flexibilité est la possibilité pour un équipement de laboratoire de fabriquer en petites séries, ou pour un équipement de production de permettre les paramétrages nécessaires à la R&D. On trouve des exemples de ce type d'équipements dans les laboratoires de microélectronique : pour rentabiliser l'usage des équipements, le temps-machine qui n'est pas dédié à la R&D peut être utilisé à fabriquer des tranches de composants ;
- la mutualisation de moyens est une tendance lourde de l'industrie française. Avec l'appui des pouvoirs publics (État, collectivités territoriales, agences de moyens, etc.), les industriels se groupent de manière plus ou moins formelle pour exploiter en commun un outil de R&D, d'analyse, de production, ou directement des travaux de recherche d'intérêt général ;
- enfin, il devient impératif de savoir produire très rapidement et avec une qualité immédiate des petites séries de composants ou systèmes.

Les tendances technologiques

Les méthodes industrielles et les outils de conception

Des efforts marqués sont fournis par les industriels pour utiliser de nouvelles

méthodologies de conception. La gestion de la complexité des systèmes conçus en commun par des acteurs multiples au sein de l'entreprise ou d'entreprises différentes impose, outre des étapes communes de conception, des critères communs de validation des différentes étapes. Dans cette optique, des outils organisationnels, exploitant de manière intensive l'outil informatique, se diffusent dans l'industrie, en partant des grandes entreprises pour gagner peu à peu les petites entreprises industrielles, fournisseurs de rang 2 des grands groupes.

Par exemple, les outils de travail collaboratif au sens large, et de coconception, en particulier, sont un des axes de développement des outils logiciels de conception et de gestion de la production.

Afin de garantir la rapidité de conception des produits et des procédés, il est de plus en plus fait usage de la simulation, qui s'appuie sur des modélisations poussées des systèmes concernés. Ainsi, si la simulation permet de tester un objet avant sa fabrication (prototypage virtuel), elle permet également de « construire » entièrement et de simuler le fonctionnement d'une chaîne de production ou d'une chaîne logistique, par exemple.

En conception, les outils de simulation devront de plus en plus prendre en

charge les aspects suivants :

- le caractère multidisciplinaire de la conception : la simulation doit permettre l'échange des données entre les différents champs de la simulation, c'est-à-dire entre des disciplines différentes ;
- le caractère multiéchelle : la tendance à la diminution de la taille, caractéristique des composants, notamment dans le domaine des nanotechnologies ou des matériaux (matériaux nanostructurés), rend nécessaire la prise en compte de phénomènes physiques micro et macroscopiques lors de la conception d'un produit. L'articulation entre ces deux échelles de phénomènes devient un axe de développement des outils de simulation dédiés à la conception.

Les machines et équipements industriels

On peut mettre en évidence plusieurs tendances technologiques fortes dans le domaine des équipements industriels :

- de plus en plus, il est tenu compte de l'opérateur lors de la conception des interfaces homme-machine. L'ergonomie bénéficie des travaux fondamentaux menés dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de l'informatique ou encore des interfaces industrielles ;
- dans un parc hétérogène d'équipements industriels, la transmission de données reste encore difficile à l'heure

actuelle. Cependant, des efforts doivent être faits pour établir des normes sur les protocoles de communication, qui seront reprises par les fabricants d'équipements de production et de contrôle pour assurer une compatibilité minimale des équipements entre eux ;

- dans de nombreux domaines, la propriété de l'environnement de production est un enjeu important pour garantir la qualité des produits fabriqués. Ce facteur doit être pris en compte dans la conception des équipements dédiés.

Sur un plan technique, deux tendances fortes guident les développements technologiques pour les équipements médico-chirurgicaux :

- la convergence entre biologie et médecine pour l'analyse fait que les techniques de diagnostic tirent parti des développements des méthodes d'imagerie des sciences du vivant et d'analyse biologique pour améliorer, d'une part la compréhension des phénomènes physiologiques, d'autre part l'analyse in vivo des tissus, pour un diagnostic plus sûr, plus rapide et éventuellement moins contraignant pour le patient ;
- l'amélioration des méthodes chirurgicales mini-invasives constitue, également, un objectif majeur pour limiter l'importance de l'intrusion des interventions chirurgicales, et par conséquent la durée et le coût des interventions et des hospitalisations.

Technologies et méthodes de production



74. Contrôle de procédés par analyse d'image

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

L'analyse d'image occupe une part de plus en plus importante dans le contrôle industriel. Dans la chaîne de production industrielle, elle est utilisée dans différentes applications pour :

- la vision industrielle : l'automate de production est doté de capacités de « vision » permettant d'adapter l'action au contexte ;
- le contrôle en ligne : l'analyse par différents moyens utilisant l'image des objets industriels en cours de fabrication permet un contrôle en ligne de la qualité et un tri automatique des objets ;
- la métrologie hors ligne : l'analyse d'image permet également le contrôle hors ligne d'objets industriels (métrologie 3D par exemple).

Le groupe de technologies, objet de cette fiche, comprend toutes les « briques » techniques entrant dans la composition d'une chaîne de traitement par analyse d'image pour le contrôle de procédés industriels, qu'elles soient matérielles, logicielles ou conceptuelles :

- technologies de capture d'image (caméras, cartes vidéo, etc.) ;
- traitement et analyse d'image ;
- technologies de reconnaissance de forme ;
- thermographie infrarouge ;
- imagerie spectroscopique ;
- analyse statistique.

Ces technologies sont intégrées à la chaîne de production, et possèdent, de ce fait, des liens évidents avec les outils de production, notamment avec la chaîne de communication. Ce positionnement fait apparaître un verrou transversal de l'outil industriel qui porte sur la normalisation des protocoles de communication machine-machine.

Les dispositifs de traitement et d'analyse

d'image sont en cours de diffusion. Leur développement est au stade industriel. Cependant ces technologies sont en constant progrès à travers leurs diverses composantes : matérielles (caméras, cartes vidéo, calculateurs) et logicielles (reconnaissance de forme, analyse de granularité, colorimétrie,...). Les évolutions de l'analyse automatique d'image permettent d'envisager de nouvelles applications, augmentant le périmètre des usages possibles.

Enjeux, Impact

Dans le contexte industriel français, les enjeux sont importants en termes de compétitivité industrielle pour deux types d'acteurs. Les sociétés proposant de tels dispositifs sont tenues de rester au meilleur niveau de compétences pour faire face à une concurrence étrangère prédominante. D'autre part les industriels utilisent de plus en plus ces systèmes permettant d'automatiser, d'accélérer et de fiabiliser le contrôle de production. Les industriels du domaine étant pour la plupart étrangers, l'enjeu pour la compétitivité française se situe essentiellement dans l'amélioration du contrôle pour les utilisateurs.

Cependant, on constate que la France possède un niveau relativement élevé d'expertise dans le domaine du traitement d'image à travers le tissu de la recherche académique. Quelques PME françaises se positionnent également sur ce créneau. Le potentiel existe donc pour un développement accru de l'activité dans les applications industrielles de l'analyse d'image.

Marché

Les usages de ces technologies sont nombreux. Dans le contrôle de procédé, l'analyse

Technologies et méthodes de production

d'image en ligne de production a essentiellement deux types d'applications :

- le contrôle de la qualité de la production ;
- le contrôle des équipements de production eux-mêmes.

Des exemples de caractéristiques qu'il est possible de contrôler sont indiqués ci-après :

- la couleur (production manufacturière, agroalimentaire...) ;
- la texture (emballage, cosmétique...) ;
- la forme, les dimensions (toutes industries manufacturières, décodage d'ADN...) ;
- la température (surveillance des points chauds sur un four...) ;
- le comptage d'objets ;
- la détection de défauts (déformations, teinte, corrosion...) ;
- la granularité (analyse de poudres, de grains, de farines...).

Le potentiel de diffusion de la technologie est important. Si ces technologies sont déjà couramment utilisées par les industriels, les PME-PMI, dans leur grande majorité, ne tirent pas encore parti de ces technologies. Le potentiel de marché se trouve donc dans une diffusion plus large de ces technologies vers de nouveaux acteurs, éventuellement à travers de nouvelles applications.

La croissance attendue du marché des systèmes compacts de vision (ne faisant pas intervenir un traitement par un PC externe) est de l'ordre de 10 % jusqu'en 2011, date à laquelle le marché des systèmes compacts atteindra 1 Md\$. Le marché global de la vision industrielle représentait en 2002 5,3 Md\$ dans le monde, dont 1,3 Md\$ pour le marché européen, le marché le plus important étant le marché japonais. Il apparaît que

les secteurs d'applications les plus porteurs du marché des systèmes compacts sont les secteurs agroalimentaire, pharmaceutique et de l'emballage.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : optique, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : informatique, optique, analyse, mesure et contrôle.

■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

■ Liens avec (technologies) : automatisation du tri des déchets ; traçabilité ; interfaces humain-machine ; affichage nomade ; capteurs intelligents et traitement du signal ; procédés et systèmes de photonique ; nouveaux procédés de traitement de surface ; procédés de mise en forme de matériaux innovants ; gestion des flux de véhicules ; acquisition et traitement de données ; infrastructures routières intelligentes.

■ Principaux acteurs français

Industriels : BFI Optilas, Cognex France, I2S Vision, Kinoptik, Lord Ingénierie, Satimage, Tekcim, ...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Cognex Corp (États-Unis), Dalsa Coreco (Canada), Matrox Imaging (Canada), MVTec Software (Allemagne), National Instruments (États-Unis), Stemmer Imaging (Allemagne), Viscom AG (Allemagne) ...

■ Pour en savoir plus :

www.machinevisiononline.org

www.inria.fr

www.jautomatise.com

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; habillement, cuir ; édition, imprimerie, reproduction ; industrie pharmaceutique ; industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements mécaniques ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; industries extractives ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; industrie textile ; travail du bois et fabrication d'articles en bois ; industrie du papier et du carton ; chimie, caoutchouc, plastiques ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques ; production de combustibles et de carburants ; captage, traitement et distribution d'eau ; bâtiment ; travaux publics.

Technologies et méthodes de production



75. Capteurs intelligents et traitement du signal

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Dans cette fiche, un capteur intelligent est défini comme un système intégré comprenant d'une part le moyen de réaliser une mesure (capteur proprement dit), d'autre part les moyens de conversion de cette mesure en une information utilisable directement par un système de niveau supérieur ou un opérateur humain (« intelligence » ou traitement du signal et communication). Dans la plupart des cas, l'information traitée est émise sur un réseau de communication sous forme numérique. À l'heure actuelle, les capteurs intelligents se retrouvent dans un grand nombre d'applications qui ont vocation à devenir de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que les technologies d'intégration (micro et nanosystèmes) se développent.

Les capteurs intelligents sont partie intégrante des grands systèmes complexes que sont les avions, les véhicules spatiaux mais aussi les automobiles, les bâtiments et les ouvrages d'art. Sont compris comme capteurs intelligents les capteurs « faible flux », permettant la capture de signaux faibles, et les capteurs « répartis », construisant une information unique à partir de points de capture répartis sur l'objet de la mesure.

Verrous

Différents verrous technologiques doivent être levés suivant le type de capteur. Parmi les plus importants :

- l'intégration des différents composants dans des systèmes dont les caractéristiques sont adaptées à l'application. À titre d'exemple, les contraintes sur un capteur de vibrations destiné à un appareil photo (taille, dynamique, etc.) sont très différentes de celles d'un capteur de vibration destiné à la surveil-

lance d'un ouvrage d'art. Ainsi les technologies permettant de lever ces verrous relèvent tant des nanocomposants que de l'électronique intégrée ou de l'informatique embarquée. Techniquement, l'intégration de l'électronique doit se faire au plus près du capteur pour bénéficier de l'intégralité du signal disponible en limitant les sources de bruit additionnelles ;

- la capture du signal : alors que certaines techniques de mesure sont parfaitement maîtrisées, de nouveaux capteurs doivent être mis au point dans certains domaines, pour des raisons de coût ou de performance (capteurs optiques de détection d'espèces chimiques, accéléromètre triaxe...)
- le coût des composants : suivant le domaine d'application, le coût de développement et de fabrication est l'enjeu majeur. À titre d'illustration, le secteur automobile n'intègre des technologies dans ses véhicules moyen de gamme et bas de gamme que lorsque leur prix d'achat en volume est compatible avec les contraintes propres au secteur ;
- enfin, le conditionnement des capteurs est également un enjeu technique important pour l'implantation des capteurs dans des milieux « hostiles » (humidité, température, vibrations, etc.).

Applications

Des capteurs intelligents sont d'ores et déjà intégrés dans des systèmes complexes tels que les véhicules terrestres, les aéronefs, les équipements de production. Les développements à poursuivre concernent aussi bien les technologies de capteur que l'intégration ou les protocoles de communication.

La tendance est également orientée vers le développement de capteurs intégrant la mesure de plusieurs grandeurs pour en tirer

Technologies et méthodes de production

une information à haute valeur ajoutée.

Enfin, le capteur intégrant un calculateur est potentiellement en mesure de tenir compte d'informations externes pour traiter le signal (influence de la température sur la mesure, auto-calibrage, etc.).

On peut également citer comme partie importante des capteurs intelligents les antennes adaptatives (par exemple bibandes ou tribandes), dont les évolutions permettront le développement de nouvelles applications dans le domaine des communications.

Enjeux, Impact

Le développement et l'application de normes dans ce domaine est, de l'avis général, l'enjeu principal pour la réussite commerciale des produits réalisés. Deux points sont plus particulièrement préoccupants : la connectique et les protocoles de communication (CAN ou *Controller Area Network* dans un véhicule, par exemple, norme EN 50170 sur les réseaux de terrain). La normalisation et sa mise en œuvre sont un enjeu majeur du développement des capteurs intelligents. Le consortium FlexRay s'est constitué pour promouvoir des normes de communication dans l'automobile (*x-by-wire*). La norme IEEE P1451 vise à uniformiser les interfaces *plug-and-play* pour les capteurs intelligents.

L'enjeu est crucial pour la compétitivité française, que ce soit au niveau des marchés des capteurs intelligents ou de la maîtrise des technologies entrant dans la conception des systèmes complexes.

L'objectif des investissements dans le domaine des capteurs intelligents est de renforcer la position de la France, qui est déjà dans le peloton de tête pour le développement de certains de ces capteurs intelligents, aussi bien d'un point de vue industriel qu'académique. L'impact en termes d'emplois à moyen terme est important, de manière directe pour la conception et la fabrication des composants, et indirecte pour les implications dans les systèmes complexes et les outils de conception et de production. Le potentiel en R&D dans les domaines connexes aux capteurs intelligents renforce l'attractivité du territoire français pour les industriels du secteur, et notamment des régions en pointe telles que Rhône-Alpes et Paca.

Marché

Tous les secteurs industriels, plus particulièrement l'aéronautique, l'automobile, les équipements de production, le BTP constituent des marchés pour les capteurs intelligents. Ainsi, au niveau :

- de l'automobile : capteurs d'assiette, de freinage, de patinage. Dans ce domaine, les capteurs intelligents sont d'ores et déjà adaptés aux protocoles standardisés de communication. Le coût est un enjeu important ;
- de la télésurveillance : cette application est un secteur extrêmement porteur à moyen terme, notamment dans le domaine médical. Le capteur lié à la télésurveillance inclut soit un moyen de communication à distance (surveillance d'ouvrages d'art par exemple), soit un enregistreur de données (surveillance médicale à domicile) ; dans ce dernier cas, la transmission des données peut se faire depuis le domicile du patient vers le praticien ;
- de la domotique et des applications en électronique domestique : appareils photo, détecteurs de fumée... ;
- du contrôle industriel ;
- de la gestion du bâtiment ;
- des nouvelles applications : les capteurs sont partie prenante des nouvelles interfaces homme-machine dans le cadre notamment des systèmes de réalité virtuelle (gants tactiles, casques de réalité virtuelle, etc.) ;
- enfin, de toutes les applications ayant à prendre en compte l'environnement et qui sont susceptibles d'inclure ce type de technologie.

Le marché des capteurs est évalué à 50 Md\$ en 2008. La tendance est à une augmentation forte du marché dans les années à venir, avec une croissance annuelle moyenne envisagée de l'ordre de 7 % pour les États-Unis, cette croissance étant portée essentiellement par les capteurs à haute valeur ajoutée.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : biochimie, traitement du signal, électronique, optronique.
- Compétences technologiques : semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle.
- Pôles de compétitivité : Elopsys (Limousin et Midi-Pyrénées), System@tic (Île-de-

291

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; bâtiment ; travaux publics ; services personnels et domestiques.

Technologies et méthodes de production

France), Minalogic (Rhône-Alpes), Micro-techniques (Franche-Comté).

■ Liens avec (technologies) : automatisation du tri des déchets ; systèmes d'enveloppe de bâtiment ; traçabilité ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; RFID et cartes sans contact ; acquisition et traitement de données ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; contrôle de procédés par analyse d'image ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Leti, Lime ...

Industriels : Auxitrol, ST Microelectronics, Valéo, ...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Analog Devices (États-Unis), Delphi (États-Unis), Freescale (États-Unis), Honeywell (États-Unis), Texas Instruments (États-Unis), Xerox (États-Unis), PCB Piezotronics (États-Unis), Omron (Japon), Philips (Pays-Bas), Infineon (Allemagne), Beis Sensors&Systems (Allemagne), Robert Bosch (Allemagne), ...

■ Pour en savoir plus : www.sensorsportal.com

Technologies et méthodes de production



76. Assemblage multimatériaux

Description

L'évolution des techniques d'assemblage accompagne la généralisation des systèmes multimatériaux développés pour répondre aux exigences des marchés utilisateurs : allègement, esthétique, nouvelles fonctionnalités. La réussite de la synergie des propriétés des différents matériaux composant une structure passe par la transmission optimale des contraintes entre eux. Les techniques concernées utilisent des mécanismes physiques (soudage, brasage, rivetage, vissage, boulonnage, sertissage,...) ou chimiques (collage).

Dans le domaine du soudage, les innovations concernent, notamment, le développement du soudage laser et du soudage par friction. Le soudage à l'arc connaît également de nouveaux développements (soudage bifil), ou est associé à ces nouvelles techniques (soudage hybride laser-arc). D'autres techniques physiques se développent parallèlement au soudage laser et par friction : assemblage par faisceaux d'électrons, par ultrasons, par explosion.

Le collage, utilisé seul ou en combinaison avec d'autres techniques, permet de grands nombres d'assemblages multimatériaux, ainsi qu'un allègement des structures et une amélioration de l'esthétique. Des évolutions restent nécessaires pour améliorer la durabilité (tenue en température et en environnements sévères) et la rapidité des assemblages par collage. Les conditions d'hygiène et de sécurité apparaissent également comme des verrous au développement du collage. La combinaison de différentes techniques permet de bénéficier de leurs avantages respectifs. Les technologies considérées ici sont transversales, et permettent d'élargir la gamme des matériaux à assembler : alliages

difficiles à souder, aluminium, plastiques, bois, textiles... Parallèlement, le développement des techniques d'évaluation non destructive des assemblages est également important.

La durabilité des assemblages est un point clé pour le développement de ces techniques. La présence d'interfaces à diverses échelles, qu'il s'agisse de raccordement de structures, en particulier constituées de matériaux différents, par tous procédés (rivetage, soudage, collage...) ou de réalisation de multimatériaux, voire de composites, met en jeu des phénomènes spécifiques, particulièrement sensibles à l'environnement et aux effets de couplage.

Enjeux, Impact

Les principaux enjeux socio-économiques du développement des technologies d'assemblage sont en fait associés aux enjeux des structures et composants multimatériaux : solidité, durabilité, légèreté, sécurité, esthétique. Ces enjeux correspondent aux propriétés recherchées dans les domaines d'application de la technologie. Par exemple, favoriser l'allègement des structures contribue à limiter les consommations énergétiques des moyens de transport.

Des enjeux spécifiques aux techniques d'assemblage existent également. L'amélioration de la durabilité représente un bénéfice du point de vue de la sécurité. L'évolution des techniques de collage doit se faire dans le sens d'un moindre impact environnemental des procédés (réduction des émissions et des solvants) et des produits.

Le respect des exigences réglementaires est un autre enjeu pour les techniques d'assemblage : remplacement du brasage au plomb ou capacité à être désassemblé pour permet-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

tre le recyclage des produits en fin de vie (véhicules hors d'usage, équipements électriques et électroniques,...).

Par ailleurs, les innovations dans le domaine visent, dans la plupart des cas et souvent comme premier objectif, à réaliser des gains de productivité : économie de temps, économie d'étapes (phases de préparation...). Les nouvelles techniques d'assemblage contribuent ainsi à la compétitivité des nombreux secteurs industriels utilisateurs. L'impact de ces gains de productivité est largement perçu par les entreprises. D'après une étude du ministère chargé de l'Industrie datant de 2002, de nombreuses entreprises ont connu des évolutions du mode d'assemblage au cours des dernières années : 13 % ont ainsi changé de technique d'assemblage. Dans certains secteurs industriels, ces évolutions et changements se matérialisent par des gains de productivité significatifs sur l'opération d'assemblage.

Marché

Les marchés les plus exigeants en termes de performances des matériaux et des structures, pour lesquels les environnements sont sévères, portent les évolutions technologiques dans le domaine de l'assemblage : aéronautique, aérospatiale et construction navale, notamment.

De nombreux autres marchés, pour lesquels l'allègement, l'esthétique ou la complexité des formes sont importants, sont également concernés par les évolutions des techniques d'assemblage multimatériaux : ameublement, automobile, bâtiment, emballage, ferroviaire, mécanique, nautisme, sports et loisirs...

Les entreprises réunies au sein des groupes « soudage-coupage » et « assemblage-montage » du Symap (Syndicat de la machine-outil, du soudage, de l'assemblage et de la productique associée - France) ont réalisé un chiffre d'affaires supérieur à 1,2 Md€ en 2002.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, matériaux, optique, physique des milieux denses, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, chimie macromoléculaire, traitements de surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail des matériaux, procédés thermiques, composants mécaniques, transports, spatial - armement.

■ Pôles de compétitivité : EMC2 (Pays de la Loire), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

Le pôle EMC2, initié par Airbus, Alstom, DCN et le groupe Beneteau, est particulièrement concerné par les technologies d'assemblage ; l'un des projets du pôle est consacré spécifiquement à la conception et l'assemblage des multimatériaux.

■ Liens avec (technologies) : systèmes d'enveloppe de bâtiment ; textiles techniques et fonctionnels ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; turbomachines ; fonctionnalisation des matériaux ; nouveaux procédés de traitement de surface ; procédés de mise en forme de matériaux innovants.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cetim, CLFA, CNRT-Multimatériaux, composites et systèmes (Bordeaux), Creacol, CTBA, Institut de soudure, Lermab Nancy, Rescoll.

Industriels : Air Liquide Welding, Bostik, Symap : Syndicat de la machine-outil, du soudage, de l'assemblage et de la productique associée.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Edison Welding Institute (États-Unis), Huntsman (États-Unis), Henkel (Allemagne), TWI (Welding Institute - Royaume-Uni).

Commentaires

Les technologies d'assemblage multimatériaux bénéficient de la présence sur le territoire français de plusieurs leaders mondiaux sur les marchés qui portent l'innovation du secteur : Airbus, Alstom, DCN et le groupe Beneteau notamment. Les constructeurs automobiles sont également utilisateurs de ces technologies. L'expertise française dans les domaines du soudage et du collage est un atout.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; industries des équipements mécaniques ; bâtiment.

Technologies et méthodes de production



77. Micro et nanocomposants

Description

Les nanocomposants représentent l'évolution vers un ordre de grandeur inférieur des microcomposants et microsystèmes. Les évolutions des microcomposants et microsystèmes vers les nanocomposants et nanosystèmes recouvrent un ensemble de verrous auxquels les technologies objets de cette fiche permettent de répondre tels que :

- inventer de nouvelles applications (biopuces...);
- miniaturiser les architectures actuelles en microélectronique ;
- améliorer la durée de vie des composants ;
- fiabiliser les composants ;
- conditionner-encapsuler les composants pour des utilisations dans des conditions données (température, vibrations, rayonnement...);
- créer de nouvelles fonctions (microfluidique, électronique de spin...);
- intégrer des fonctions hétérogènes : électriques, optiques, électroniques, mécaniques, logiques, magnétiques.

Les objets porteurs de ces technologies se trouvent alors dans des circuits électroniques, des capteurs, des filtres optiques, des actionneurs (MEMS ou *Micro Electro Mechanical Components*, MOEMS ou *Micro Opto-Electro Mechanical Components*), etc. Les technologies clés pour la réalisation de ces composants ou systèmes comprennent de manière non exhaustive :

- les procédés de lithographie : photolithographie, moulage, gravure ionique, etc. On note que les procédés de photolithographie sont à un tournant de leur évolution. Les prochaines technologies de gravure à une longueur d'onde de 157 nm sont en passe d'être évincées au profit des technologies en extrême UV, pour lesquelles les outils en

développement sont en rupture par rapport aux outils actuels ;

- les procédés d'assemblage moléculaire : l'hybridation de certaines espèces sur des espèces différentes permettent la création de milieux auto-organisés à l'échelle moléculaire, pour optimiser les performances des matériaux ou faciliter leur mise en forme ;
- la simulation des procédés de fabrication ;
- les outils d'aide à la conception des systèmes : outils de design, de simulation du composant et de son conditionnement. Dans cette catégorie entrent des logiciels de calcul multiéchelle qui permettent de passer des propriétés microscopiques des matériaux et interfaces aux propriétés macroscopiques du composant ;
- les outils de contrôle et de caractérisation des composants, aussi bien pour une phase amont que lors de l'industrialisation : propriétés électroniques, mécaniques, vibratoires, optiques, contrôle de la forme et des dimensions ;
- les méthodes de conception assurant un fonctionnement fiable et durable. Dans certains cas, les composants et systèmes réalisés doivent garantir un niveau de performances dans un environnement sévère (par exemple, accéléromètres pour déclenchement d'airbags) ;
- les matériaux, essentiellement à base de semi-conducteurs, incluent de plus des diélectriques, des céramiques, etc. pour leurs propriétés optiques, électriques, thermiques, mécaniques ;
- les outils de fabrication : la miniaturisation des composants existants et les nouvelles fonctions rendues possibles par cette miniaturisation demandent des outils de production différents des outils actuels, au-delà de la lithographie elle-même : conditionnement,

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

manipulation, croissance de couches, usinage (dont *Focus Ion Beam*) ;

- les architectures d'intégration : traditionnellement planaires, elles exploitent de plus en plus la troisième dimension pour améliorer la compacité des systèmes et leurs performances. Notamment, la nanoconnectique est un concept en cours de développement chez les grands fondeurs.

Ces technologies sont en phase de croissance. Les grands acteurs du domaine ont déjà établi leur expertise sur le sujet, mais cette famille de technologies recèle encore un potentiel de développement technique important. Notamment, de nouveaux objets inexistant à l'échelle micrométrique sont développés : nanofils, nanotubes... La compréhension des phénomènes inhérents à ces structures se fait au niveau quantique.

Enjeux, Impact

Pour ces technologies, les enjeux normatifs sont importants, tout comme pour les capteurs intelligents et le traitement du signal. Au niveau socio-économique, l'enjeu majeur pour la France est le développement de l'emploi dans ce secteur, via la conception et la fabrication de produits à forte valeur ajoutée. Par ailleurs, des enjeux en termes de standardisation des méthodes de fabrication existent. Cette standardisation permettra aux leaders du marché, lorsque celui-ci sera plus mûr, de sous-traiter une partie de la production, de la même manière qu'en microélectronique, à l'heure actuelle.

La France est un territoire d'ores et déjà hautement attractif pour les industriels des nanocomposants en raison de la forte concentration et du haut niveau d'expertise des acteurs académiques et industriels autour des centres de Grenoble, Rousset, Sophia-Antipolis et Paris Sud. L'impact en termes d'image est donc primordial.

Économiquement, les systèmes intégrés décrits ci-dessus sont considérés comme un des moteurs de la croissance des années à venir. Les emplois créés sont des emplois à haute valeur ajoutée, et contribuent à renforcer l'expertise française dans le domaine.

Marché

Les nanocomposants trouvent leur usage dans un grand nombre de domaines, parmi

lesquels, sans les citer tous :

- les circuits électroniques et optoélectroniques : la réduction de la largeur de trait, caractéristique de la densité surfacique de composants, améliore les fréquences de fonctionnement. Cette réduction de la résolution des motifs induit, à terme, des changements dans les phénomènes physiques mis en jeu dans le fonctionnement des systèmes. Le marché global des semi-conducteurs devrait représenter en 2005 un marché mondial de 226 Md\$, dont 41 Md\$ en Europe. La croissance annuelle attendue du marché européen et mondial est comprise entre 5 % et 10 % dans les années à venir ;
- les capteurs de mouvement (accélération, vibrations, rotation) : les technologies de gravure actuelles permettent d'ores et déjà de fabriquer des capteurs utilisant des pièces en mouvement à l'échelle du micromètre (MEMS). L'enjeu, pour ces applications, réside en grande partie dans les techniques de fabrication (fiabilisation) et le conditionnement. Un autre enjeu technique pour les microcapteurs est le niveau de bruit électrique comparé à la faiblesse du signal utile qui impose une intégration à proximité de l'élément de conversion du circuit d'amplification ;
- les microactionneurs (MEMS, MOEMS) : les actionneurs à l'échelle micro ou nanométrique sont des composants clés des micro-systèmes. Leur fonction peut être une interruption électrique, un routage optique ou une déflexion de lumière (vidéoprojecteurs), ou toute autre action à base mécanique. Le premier usage des MEMS en volume dans le monde est actuellement dans le domaine automobile (accéléromètres pour airbags, capteurs de pression pour pneus) ;
- les micromoteurs électrostatiques.

Le seul marché des MEMS a doublé en trois ans pour atteindre 5 Md\$ dans le monde en 2005. Cette dynamique se poursuivra dans les années à venir, portée par le développement de nouvelles fonctions, rendues elles-mêmes possibles par l'évolution des technologies clés précitées.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, physique théorique, optique, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction aéronautique et spatiale ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de composants électroniques ; postes et télécommunications.

Technologies et méthodes de production

■ **Compétences technologiques** : composants électriques, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, traitements surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques.

■ **Pôles de compétitivité** : System@tic (Île-de-France), Minalogic (Rhône-Alpes), Solutions communicantes sécurisées (PACA), Microtechniques (Franche-Comté).

■ **Liens avec (technologies)** : traçabilité ; gestion de la microénergie ; stockage de l'information numérique ; processeurs et systèmes ; RFID et cartes sans contact ; matériaux pour l'électronique et la mesure ; capteurs intelligents et traitement du signal ; procédés et systèmes de photonique ; composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; vectorisation ; imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit.

■ **Principaux acteurs français**

Centres de compétences : CEA Leti, Minattec, Réseau national en nanosciences et nanotechnologies (R3N).

Industriels : ST Microelectronics, Philips Semiconducteur, Freescale Semiconductor, (regroupés dans l'alliance Crolles2) ; Memscap, Sofradir, Teem Photonics, Soitec.

■ **Exemples d'acteurs dans le monde** : Forschungszentrum Rossendorf (FZR, Allemagne), Massachusetts Institute of Technology (MIT, États-Unis), Bell laboratories (États-Unis), Kavli Nanosciences Institute (Caltech, États-Unis) ; Intel (États-Unis), Texas Instruments (États-Unis), Analog Devices (États-Unis), Canon (Japon), Hitachi (Japon), Samsung (Corée du Sud), Infineon (Allemagne), Robert Bosch (Allemagne).

■ **Pour en savoir plus** :

Plate-forme technologique européenne pour la nanoélectronique (www.cordis.lu/ist/eniac).

Rapport parlementaire Microélectronique et nanotechnologies : une chance à saisir (www.senat.fr/rap/r02-244/r02-244.html).

Réseau de recherche en micro et nanotechnologies - réseau nanosciences et nanotechnologies (www.rmnt.org).

À la découverte du nanomonde (www.recherche.gouv.fr/brochure/nanomonde.pdf).

Commentaires

L'observatoire des micro et nanotechnologies, unité mixte de service CEA-CNRS, créée en 2005, maintient une veille stratégique sur les sujets liés aux micro et nano-objets, au niveau de la science et des procédés de fabrication.

Technologies et méthodes de production



78. Procédés et systèmes de photonique

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La photonique est une science dont les applications sont par essence diffusantes dans un grand nombre de domaines d'application, au même titre que l'électronique. La photonique est la science qui traite des photons, particules élémentaires composant la lumière. Ainsi, les systèmes photoniques sont des dispositifs qui permettent de générer, conduire, traiter et détecter la lumière. La nature, l'échelle et les longueurs d'ondes des systèmes considérés sont très variées. On peut citer les exemples suivants :

- sources de photons :
 - lasers et diodes laser pour applications industrielles, grand public, de recherche, etc. ;
 - diodes électroluminescentes (DEL) pour la signalisation, l'éclairage, la transmission de données ;
- matériaux :
 - méthodes sol-gel pour la réalisation de nouveaux matériaux ;
 - cristaux photoniques ;
 - boîtes quantiques, puits quantiques ;
 - couches minces ;
- transmission et mise en forme :
 - guides d'ondes (fibres, guides planaires) pour conduire la lumière ;
 - les filtres, modulateurs et tous éléments actifs permettant de mettre en forme un signal optique ;
 - les composants optoélectroniques ;
- détection, mesure : les instruments de mesure, de détection, de diagnostic à base d'optique ou de photonique (microscopes confocaux, à sonde, capteurs à fibre optique, endoscopes...) ;
- conception : les logiciels de conception et de simulation des systèmes photoniques, comme dans les autres domaines, sont dés-

ormais un élément clé du développement du secteur ;

- procédés de fabrication : technologies du semi-conducteur et des MEMS (*Micro Electro Mechanical Components*).

Tendances technologiques

Les évolutions des dispositifs photoniques suivent deux tendances fortes : l'une vers des dispositifs de dimensions de plus en plus petites et avec des constantes de temps de plus en plus faibles (lasers femtoseconde, par exemple), l'autre vers des dispositifs à forte puissance, dont un cas extrême est le laser Megajoule.

Par ailleurs, la conception de ces dispositifs est de plus en plus multidisciplinaire, couplant optique, mécanique, électronique, biologie, chimie, sciences des matériaux, etc. Les procédés de conception des systèmes photoniques tirent parti de ces différentes disciplines. Ainsi, les MOEMS (*Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*) sont directement liés aux technologies des micro et nanocomposants, et tirent parti des technologies du semi-conducteur pour leur fabrication. Les capteurs opto-chimiques et les procédés sol-gel nécessitent des compétences en chimie. Les outils de diagnostics en sciences du vivant font intervenir la biologie.

Enjeux, Impact

Le développement de l'industrie française et européenne dans le secteur de la photonique est faible en comparaison du niveau élevé de la recherche dans ce domaine. Si le marché très porteur des écrans plats de grande dimension est inaccessible à l'industrie française en raison d'un retard d'investissements difficile à rattraper et de coûts de main-d'œuvre élevés, la photonique reste un

Technologies et méthodes de production

secteur de production à haute valeur ajoutée. Il devra répondre aux besoins de la société de l'information en matière de transport, traitement et stockage de l'information.

La filière française, organisée en pôles régionaux regroupés au sein du Comité national d'optique et photonique (Cnop), met l'accent sur les systèmes à forte valeur ajoutée. L'enjeu pour l'industrie française est de maintenir et d'améliorer sa position sur le marché des composants et systèmes photoniques. La maîtrise de ces technologies est particulièrement stratégique compte tenu de la place qu'elles occupent dans l'économie mondiale.

L'industrie française de la photonique représente quelque 20 000 emplois. Son développement est susceptible de permettre la création de nombreux emplois à forte qualification.

Marché

Le marché mondial de l'industrie photonique était estimé en 2004 à 203 Md\$, soit le même ordre de grandeur que l'industrie des semi-conducteurs. La croissance annuelle du marché de la photonique atteint 15 % en moyenne, contre 10 % jusqu'en 2003, faisant de ce secteur l'un des plus dynamiques. La part de l'Europe est estimée à environ 60 Md\$.

La plus forte croissance du marché est constatée dans le domaine des écrans plats, toutes technologies et tailles confondues, avec une croissance annuelle de 41 %. Le deuxième segment le plus dynamique est le segment des composants optoélectroniques, avec une croissance annuelle de 26 % (le seul marché des diodes électroluminescentes était évalué à 2 Md\$, en 2002). Le marché des instruments de lithographie pour les semi-conducteurs est, lui, estimé à 1 Md\$.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, physique théorique, optique, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, traitements de surface, procédés techniques.

■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Elopsys (Limousin et Midi-Pyrénées), Route des lasers (Aquitaine), Minalogic (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : automatisation du tri des déchets ; sécurité active des véhicules ; affichage nomade ; contrôle de procédés par analyse d'image ; imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant ; capteurs intelligents et traitement du signal ; micro et nanocomposants ; composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré ; stockage de l'information numérique.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, Leti, Institut d'optique, Onera, Sup'Optique, Cnop, Optics Valley, PopSud.

Industriels : Alcatel, Thales, Cilas, Teem Photonics, ST Microelectronics, Optis, Jobin-Yvon, Sagem, Corning, Essilor.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Lucent Technologies (États-Unis), Philips Semiconductor (Pays-Bas), Lumileds (États-Unis), Agilent Technologies (États-Unis), Nikon Instruments (Japon), MIT (États-Unis), Coherent (États-Unis), Schott (Allemagne).

■ Pour en savoir plus :

Société européenne d'optique (www.europeanopticalsociety.org).

Commentaires

Dans le domaine de la photonique, quelques grands projets jouent (ou joueront) un rôle moteur pour l'environnement académique et industriel : synchrotron Soleil, ITER, laser Mégajoule.

Il apparaît particulièrement stratégique, compte tenu des atouts de la France en matière de compétences dans ce domaine, de maintenir une activité industrielle forte dans les activités liées à la photonique.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Les domaines d'application de la photonique sont multiples dans la mesure où il s'agit d'une technologie essentiellement transversale, au même titre que l'électronique ou l'informatique.

On peut citer : industrie automobile ; construction navale ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de composants électroniques ; postes et télécommunications ; assainissement, voirie et gestion des déchets.

Technologies et méthodes de production



79. Nouveaux procédés de traitement de surface

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La fonctionnalisation des surfaces a toujours fait partie des procédés industriels de fabrication d'objets divers, que ce soit pour des raisons cosmétiques ou pour lutter contre la corrosion des métaux. De plus en plus, de nouvelles fonctions sont ajoutées aux surfaces des objets, et de nouveaux procédés sont mis au point pour assurer des fonctions déjà existantes, en réponse à des enjeux économiques ou environnementaux.

Les nouveaux procédés de traitement concernent aussi bien de nouvelles fonctions de surface que l'évolution des procédés de traitement inadaptés au contexte de la société actuelle (onéreux, polluants, nocifs, etc.). Les procédés de traitement ou de « fonctionnalisation » des surfaces sont extrêmement variés, faisant intervenir des briques technologiques telles que :

- la pulvérisation par plasma (éventuellement assistée par laser) ;
- le traitement chimique de la surface ou du matériau de base de l'objet induisant une modification physico-chimique des surfaces ;
- le greffage de fonctions moléculaires ;
- la nanostructuration des surfaces, texturation ;
- les procédés sol-gel ;
- la mise en forme par attaque chimique sèche (plasma) ou humide ;
- les dépôts de poudre (grandes surfaces) par voie électrostatique ;
- le traitement par laser des surfaces métalliques (décapage, formation d'alliages, dopage) ;
- le polissage, nanopolissage.

Les fonctions recherchées ont, par exemple, des propriétés données de réflectivité optique, d'anticorrosion, bactéricides, d'autonettoyage, d'adhésion, de mouillage, de frot-

tement, de sensibilité à des espèces chimiques données, etc.

La compréhension fine des mécanismes physico-chimiques en jeu aux surfaces et interfaces est un préliminaire nécessaire à la mise au point de nouveaux traitements et fonctions de surface. Elle fait intervenir les sciences des surfaces et interfaces, qui nécessitent des compétences multidisciplinaires : physique des matériaux, chimie, physico-chimie, biochimie. On note que la biomimétique est un axe de développement important de la fonctionnalisation des surfaces.

Dans ce cadre, les procédés de caractérisation et d'analyse des surfaces revêtent une importance élevée : texture, propriétés électriques ou optiques, durabilité, tenue en température, frottements...

Les technologies de traitement de surface sont en développement constant depuis plusieurs décennies. Les sciences des interfaces sont maintenant reconnues comme des disciplines scientifiques à part entière, favorisant un développement rapide de nouveaux procédés et traitements, et des transferts de technologie du monde de la recherche académique vers l'industrie.

Enjeux, Impact

Les enjeux liés à la maîtrise et au développement des technologies de traitement de surface sont multiples.

D'un point de vue économique, la fonctionnalisation des surfaces est un verrou majeur dans la conception des nouveaux produits (propriétés d'autolubrification en mécanique, d'autonettoyage pour le verre, ou bactéricides pour les téléphones portables, dureté des surfaces, résistance à la corrosion, etc.). Dans tous les secteurs industriels, la maî-

Technologies et méthodes de production

trise de la conception et de la caractérisation de nouvelles surfaces est un enjeu majeur dans la mise au point des nouveaux produits. L'enjeu environnemental est également prépondérant pour cet ensemble de technologies. L'enjeu sociétal rejoint ici la contrainte législative et normative. Le traitement de surface est historiquement une étape polluante de la fabrication de produits, à travers l'utilisation de solvants chlorés par exemple. Par ailleurs, la composition des matériaux déposés est également une source de pollution liée à l'usure des surfaces ou à une dissémination des objets finis sous forme de déchets (par exemple, l'utilisation du chrome hexavalent est interdit dans l'industrie automobile à partir de 2007). La mise au point de procédés de traitement de surface « propres », ne faisant plus appel à des solvants (passage de procédés humides à des procédés secs), ou utilisant des solvants moins polluants répond à une demande forte de la société et à des impératifs de normes de rejets pour les industriels.

Enfin, un enjeu en terme de santé apparaît de plus en plus important. La fonctionnalisation des surfaces permet de concevoir des objets permettant de limiter les risques pour la santé (surfaces biocides, non toxiques), ou entrant dans la conception d'objets thérapeutiques (articulations artificielles, verres de lunettes, outils médicaux).

Par conséquent, il apparaît que la maîtrise des technologies de traitement de surface et la mise au point de nouvelles fonctions de surface est un atout majeur dans la conception des produits manufacturés. L'impact de ces technologies sur la compétitivité des industries et par conséquent sur l'emploi est donc immédiat.

Marché

Les traitements de surface sont des applications multiples à tous les stades du développement d'un objet matériel : de la méthode de fabrication aux fonctions de l'objet fini. Ces applications couvrent tous les secteurs d'application ; par exemple la mécanique (lubrification des pièces), l'automobile (suppression des traitements au chrome VI, démouillage des pneumatiques), cosmétique (toucher des flacons), le bâtiment (vitres autonettoyantes), l'optique (nanopolissage),

la santé (revêtements bactéricides), le vernissage (à base de poudre, sans solvants, sans pulvérisation), les procédés de nettoyage sans solvant, le textile (traitements hydrophobes).

Les traitements de surface sont des technologies largement diffusées dans l'industrie, mais les progrès industriels rendent nécessaires des évolutions de ces technologies et des procédés liés ; on peut citer comme exemple de tendance lourde la mise en place de procédés sans solvants pour certains traitements de surface. Dans un grand nombre de cas, l'évolution de la réglementation est un moteur essentiel pour les investissements dans le développement des nouveaux procédés de traitement de surface.

Le caractère très diffusant des technologies de traitement de surface rend difficile l'évaluation du marché correspondant.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, chimie physique, chimie du solide, matériaux, physique théorique, génie des procédés.

■ Compétences technologiques : traitements de surface.

■ Pôles de compétitivité : Céramique (Centre, Limousin et Midi-Pyrénées), Plasturgie (Rhône-Alpes et Franche-Comté), Techtera (Rhône-Alpes), Viameca (Auvergne et Rhône-Alpes), Mipi (Lorraine), Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes), Matériaux domestiques (Nord-Pas-de-Calais).

■ Liens avec (technologies) : systèmes d'enveloppe de bâtiment ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; assemblage multimatériaux ; procédés de mise en forme de matériaux innovants ; textiles techniques et fonctionnels ; micro et nanocomposants ; fonctionnalisation des matériaux.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cemef, Cetim, ITSFC (Institut des traitements de surface de Franche-Comté), LISS (Laboratoire d'ingénierie des surfaces de Strasbourg), LSGS (Laboratoire de science et génie des surfaces de l'INPL), Laboratoire des sciences et ingénierie des surfaces (Université Lyon I), Cirimat (Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux, Toulouse). Industriels : Groupe HEF, HIT (groupe Bodycote), environ 200 entreprises répertoriées

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; industries des équipements mécaniques ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; chimie, caoutchouc, plastiques ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques.

Technologies et méthodes de production

sur (www.trs-online.com), Saint-Gobain...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Bodycote (Royaume-Uni), Pilkington (Royaume-Uni), Glaverbel (Belgique)...

■ Pour en savoir plus :

Association de traitement thermique et de

traitement de surface (A3TS) (www.attt.org)

Syndicat national des entreprises d'application des revêtements de surface (SATS) (www.sats-france.com).

Technologies et méthodes de production



80. Procédés de mise en forme de matériaux innovants

Description

Les matériaux innovants, qui répondent à des problématiques de fonctionnalisation des matériaux, d'amélioration des qualités des matériaux innovants, de process de production, etc. s'accompagnent d'évolutions des procédés de mise en forme.

Les procédés de mise en forme des matériaux innovants représentent une famille technologique à part entière. Si de nombreuses technologies nouvelles sont des évolutions de technologies existantes, de nouveaux procédés doivent être mis au point pour permettre le passage au stade industriel des recherches menées sur les matériaux au niveau du laboratoire.

Notamment, les matériaux multiconstituants posent des problèmes particuliers liés à des phénomènes de ségrégation en cours de process. Les composants peuvent se séparer ou s'orienter de manière préférentielle au cours du process de fabrication, conduisant à des problèmes d'uniformité de la structure. Des problèmes du même type peuvent être rencontrés avec des procédés de fabrication multiphase (solide-liquide, par exemple).

Quelques exemples de matériaux susceptibles de nécessiter des évolutions ou des ruptures dans les procédés de fabrications :

- les composites et nanocomposites ;
- les céramiques ;
- les poudres ;
- les polymères ;
- les nanotubes de carbone.

Les technologies de mise en forme des matériaux sont aussi variées que les matériaux concernés. On peut citer, par exemple, la compression de feuilles de fibres de verre, l'extrusion de polymères, le thixoformage d'alliages métalliques, le forgeage, l'injec-

tion, l'extrusion, la compression de poudres, le frittage, etc.

Il apparaît également que l'un des verrous de cette famille de technologies réside dans la compréhension des phénomènes qui régissent ces procédés de fabrication, et dans la capacité des industriels à modéliser et simuler ces procédés pour anticiper une partie des problèmes qui peuvent survenir sur la ligne de production. Notamment, la capacité à simuler de manière simultanée les phénomènes micro et macroscopiques est un atout certain dans la mise au point des procédés de mise en forme.

Enjeux, Impact

Le développement et la maîtrise des procédés de mise en forme des matériaux innovants sont essentiels au maintien des industries manufacturières françaises et européennes dans la compétition internationale. L'enjeu est le taux d'activité et d'emploi d'une partie de l'industrie manufacturière, tirée par les activités et produits innovants et à haute valeur ajoutée.

Un second enjeu auquel les nouveaux procédés de mise en forme sont amenés à répondre concerne l'environnement. Il devient de plus en plus important de mettre au point des procédés qui consomment moins d'énergie, d'eau, ou qui génèrent moins de déchets.

Marché

Les marchés servis par ces procédés sont l'ensemble des marchés de l'industrie manufacturière. Les matériaux innovants et procédés nouveaux se retrouvent dans toutes les gammes de biens d'équipement et de consommation, de la fabrication du papier aux boîtiers de téléphones mobiles.

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, mécanique des fluides, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, traitements de surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail des matériaux, environnement-pollution, machines-outils, procédés thermiques.

■ Pôles de compétitivité : Céramique (Centre, Limousin et Midi-Pyrénées), Plasturgie (Rhône-Alpes et Franche-Comté), Techtera (Rhône-Alpes), Industries du commerce (Nord-Pas-de-Calais), Viameca (Auvergne et Rhône-Alpes), Up-TEX (Nord-Pas-de-Calais), Vallée de L'Arve (Rhône-Alpes), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Microtechniques (Franche-Comté).

■ Liens avec (technologies) : systèmes d'enveloppe de bâtiment ; matériaux composites pour la construction, à base de matériaux recyclés ou de biomasse ; textiles techniques et fonctionnels ; architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; matériaux pour l'électronique et la mesure ; recyclage des matériaux spécifiques ; fonctionnalisation des matériaux ; assemblage multimatériaux ; nouveaux procédés de traitement de surface.

■ Principaux acteurs français

Cemef (ENSMP), Transvalor (filiale d'Armines), INPG, Aubert & Duval (Eramet), Sifcor, CETIM...

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; industries des équipements mécaniques ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; industrie textile ; chimie, caoutchouc, plastiques ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques.

Technologies et méthodes de production



81. Méthodes et outils de coconception

Description

La conception de produits industriels est de plus en plus le fait d'une collaboration entre plusieurs équipes, que l'on parle d'objets physiques, de logiciels, de procédés, etc. Cette collaboration est rendue nécessaire par, d'une part, la nécessité de recourir à des compétences multiples, de plus en plus souvent externalisées, d'autre part, la nécessité pour des sous-traitants de participer à la conception de leurs produits pour apporter un surcroît de valeur ajoutée à leur activité. Dans l'ingénierie de systèmes complexes par exemple, la coconception occupe ainsi une place de plus en plus importante : les grandes entreprises font depuis longtemps appel à la sous-traitance pour la fabrication de diverses parties d'un produit donné. De plus en plus, il est demandé au sous-traitant de concevoir cette partie, en collaboration avec les équipes du donneur d'ordre. C'est maintenant chose courante dans la construction automobile, l'aéronautique, le bâtiment ou le génie civil.

Les méthodes et outils de coconception comprennent des moyens de collaboration fondés sur :

- une organisation de l'entreprise adaptée à la coconception. Le circuit humain de circulation de l'information et de prise de décision doit être adapté aux problématiques posées par les interventions d'interlocuteurs multiples sur un objet unique ;
- un cadre de collaborations entre équipes ou entreprises qui doit prévoir le partage d'horizons temporels, de critères de fiabilité et de sûreté et de critères de performance ;
- des logiciels de conception devant comprendre des modules de prise en charge du travail collaboratif. Un corollaire de cette évolution est souvent la nécessité pour le don-

neur d'ordre d'imposer au sous-traitant ses outils logiciels. Il apparaît clairement que des tâches de gestion doivent également être facilitées par les outils ad hoc ;

- l'architecture des échanges d'information doit être pensée en fonction de ces objectifs : formats d'échanges de fichiers, lignes de transmission haut débit, etc.

Par ailleurs, la compréhension des mécanismes de fonctionnement en équipe, d'établissement du dialogue, c'est-à-dire les aspects humains de la coconception, fait l'objet de travaux de recherche par des équipes de psychologie cognitive.

Des problèmes de confidentialité des données doivent également être traités dans la conception des outils et méthodes de travail.

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Enjeux, Impact

Pour les entreprises industrielles de rang 1, la coconception représente un enjeu en termes de qualité des produits réalisés et d'économie sur les coûts de conception, ceux-ci étant supportés par le sous-traitant au sein de « l'entreprise étendue ».

Dans beaucoup de domaines, les sous-traitants de rang 1 se sont adaptés aux méthodes et outils de coconception. Un enjeu majeur existe sur la capacité des sous-traitant de rang 2 à entrer dans la boucle de conception au même titre que leurs donneurs d'ordres. L'impact immédiat de l'adaptation des PME-PMI à ces pratiques est la maintien de l'activité et des emplois dans les entreprises de sous-traitance françaises.

Marché

Les applications premières des méthodes de coconception se situent dans les industries complexes faisant intervenir de nombreux sous-traitants. L'automobile et l'aéronauti-

Technologies et méthodes de production

que sont les marchés les plus cités pour ce type d'outils. Cependant, les domaines d'application concernent tous les types de projets de conception menés par plusieurs équipes en parallèle, notamment les grands projets architecturaux.

Si certains acteurs de la CAO (par exemple Dassault Systèmes avec Catia) proposent depuis plusieurs années des modules de coconception à leurs clients, nombre de ces systèmes ne sont pas adaptés à des PME, tant en termes d'investissements financiers qu'en termes d'adéquation de l'outil au travail quotidien de la société.

Des plates-formes collaboratives sont mises en place par divers acteurs (collectivités publiques, associations professionnelles, entreprises...) pour faciliter l'appréhension par les PME sous-traitantes de rang 2 des outils de travail collaboratif et de coconception.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : génie des procédés, informatique, psychologie, sociologie.

■ Compétence technologique : informatique.

■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Solutions communi-

cantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), System@tic (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : architecture électrique des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; systèmes aériens automatisés ; outils et méthodes pour le développement logiciel ; ingénierie des systèmes embarqués ; modélisation, simulation, calcul ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; ingénierie des systèmes complexes ; technologies du web sémantique ; travaux d'infrastructures furtifs.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : plates-formes Oree (Rhône-Alpes), PI3C (Champagne-Ardenne, Cetim), Visio-concept (Numerica, Montbéliard) ; Insa Lyon - ICTT, université Bordeaux I, Inria, Pôle productique Rhône-Alpes (www.productique.org)...

Industriels : Dassault Systèmes...

Commentaires

Des efforts doivent être poursuivis par les industriels sur la voie d'une normalisation des outils pour permettre une diffusion plus large, de manière à ce qu'ils soient économiquement viables pour les petites entreprises travaillant avec plusieurs donneurs d'ordres.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements mécaniques ; industries des équipements électriques et électroniques ; bâtiment.

Technologies et méthodes de production



82. Ingénierie des systèmes complexes

Description

Les systèmes complexes sont de plus en plus présents dans la vie courante, de manière plus ou moins visible. Composés de multiples briques technologiques en interaction éventuelle avec des « systèmes » humains, ils prennent en compte de nombreuses informations pour réaliser une opération complexe de façon plus ou moins automatique. La complexité du système est généralement transparente pour l'utilisateur final, mais ses défaillances peuvent avoir des conséquences lourdes en termes humains, sociaux ou économiques.

Un système complexe peut ainsi être défini comme un système, composé de sous-systèmes, dont la conception et le fonctionnement font intervenir un certain nombre de corps de métiers différents, et qu'aucun ne peut appréhender dans son ensemble. La conception d'un système complexe requiert donc des méthodes et des outils garantissant la conformité des composants, des sous-systèmes et du système fini aux spécifications tout au long de leur réalisation : qualité de services, capacité d'accueil de nouveaux sous-systèmes, etc.

Le verrou essentiel dans la conception des systèmes complexes quels qu'ils soient demeure leur fiabilité et leur sûreté de fonctionnement. Cette fiabilité doit être attestée par construction grâce aux méthodes de conception mises en place. Toutefois, la complexité du système ne permet pas de le valider intégralement ex post dans des temps satisfaisants.

Les points techniques à prendre en compte au cours de la conception des systèmes complexes sont, entre autres :

- l'architecture du système qui doit être adaptée à la fonction recherchée et au degré

de fiabilité et de sûreté nécessaires (par exemple, l'architecture du système de contrôle d'une centrale nucléaire doit prévoir les redondances nécessaires), tout en tenant compte de la durée de vie du système (par exemple, le système doit être suffisamment ouvert pour pouvoir accueillir de nouveaux composants) ;

- la diversité des technologies et des compétences liées mises en œuvre qui doit être prise en compte dès la conception, ce qui suppose des outils génériques assurant les liens entre plusieurs de ces technologies et/ou de ces compétences et des modélisations multidomaines du même système ;
- l'environnement qu'il faut bien définir. Cette étape intervient dès la mise au point des spécifications fonctionnelles du système ;

- des systèmes de validation qui doivent pouvoir certifier le bon fonctionnement d'un système dans ses conditions d'utilisation habituelles ;

- les systèmes de défaillance qui doivent être prévus. Un système complexe peut avoir des besoins de tolérance aux fautes, par exemple assurer un service minimal dans des conditions de fonctionnement altérées. Les technologies impliquées dans l'ingénierie des systèmes complexes sont, de manière non exhaustive :

- des méthodes de conception, qui doivent être adaptées aux contraintes liées à l'objet lui-même et à la nature souvent pluridisciplinaire et multientreprise de l'équipe de conception. Par exemple, la conception industrielle selon un cycle en V permet de partir de la fonction pour concevoir les sous-systèmes puis les composants, avant de valider en sens inverse composants, sous-systèmes et système global ;

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

- des briques logicielles complexes, qui doivent être validées sans laisser de place à des erreurs possibles. Des outils de validation et de vérification de codes performants doivent être mis au point. Le logiciel occupe une part de plus en plus importante dans lesdits systèmes, qu'ils soient répartis ou embarqués ;
- des architectures ouvertes (par exemple SOA : *Service Oriented Architecture*) permettant la détection automatique des éléments composant le système et les services qu'ils offrent, assurant l'indépendance du système vis-à-vis des fournisseurs de technologies ;
- des composants et sous-systèmes électroniques, dont la fiabilité et la durée de vie dans les conditions usuelles d'utilisation doivent être garanties. Cette fiabilité concerne aussi bien le système global que ses composants ;
- tout composant physique utile au fonctionnement du système global ;
- les technologies « molles » de connaissance de l'humain en interaction avec le système (opérateur, usager...). Par exemple, des compétences en psychologie cognitives, en ergonomie, en organisation du travail, etc. sont requises dans la conception du système ; le système étant très majoritairement transparent pour l'humain, son acceptation est fortement dépendante de la perception qu'en a l'utilisateur, et donc de sa facilité d'usage.

Enfin, le problème de la coopération entre différents systèmes autour d'un objectif commun constitue, aujourd'hui, un enjeu important, tant sur le plan économique que scientifique. Cette problématique nécessite de nombreuses compétences qui actuellement sont trop sectorisées.

Enjeux, Impact

La maîtrise des systèmes complexes par les industriels est indispensable au maintien et à l'amélioration des positions de l'industrie française et européenne sur le marché mondial des grands systèmes (transports, espace, finances, santé, énergie...).

Outre cet évident enjeu industriel, l'ingénierie des systèmes (industriels) complexes doit répondre à des enjeux majeurs dans la société actuelle :

- la sécurité des personnes, usagers ou opé-

rateurs de ces systèmes, doit être préservée. Que ce soit en environnement industriel ou en utilisation courante, la complexité des systèmes rend plus difficile la prévision des défaillances. Or la complexité est présente dans de très nombreux systèmes, objets d'enjeux majeurs en termes de sécurité physique des personnes : équipements industriels, énergie (distribution, production...), automobile (véhicule, gestion d'incidents en tunnel, etc.), aéronautique (avions et contrôle aérien), ferroviaire (trains et gestion de la circulation) ;

- la survie économique des entreprises impose une gestion rigoureuse des processus. L'impact en termes d'image, par conséquent en termes d'activité, de défaillances de systèmes mis sur le marché par un industriel, est immédiat. La fiabilité et la sûreté de fonctionnement sont donc des points majeurs pour la compétitivité des industries françaises ;

- le bon fonctionnement d'une grande partie de la société moderne repose sur des systèmes complexes. Les échanges économiques (bourse, cartes bancaires, etc.), la gestion routière, ferroviaire et aérienne, les télécommunications, la défense, l'administration... reposent sur des systèmes complexes dont les défaillances ou les inadéquations à la mission ont des conséquences lourdes sur le fonctionnement de la société.

Marché

Les applications des systèmes complexes sont multiples. Ils entrent dans la constitution d'un grand nombre de systèmes de grande diffusion tels que les véhicules de tous types (automobile, lanceur spatial, avion), des systèmes aussi utilisés que les systèmes de paiement par carte bancaire, les systèmes de commandement des armées, les télécommunications, etc.

Chiffrer le marché des systèmes complexes ne peut se faire qu'à travers leurs applications. Pour les secteurs d'applications visés par le pôle de compétitivité System@tic (transport, sécurité, télécommunications, développement de systèmes), le marché est estimé à 300 Md€.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ; industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; services de transports ; activités financières ; postes et télécommunications, administration.

Technologies et méthodes de production

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : génie des procédés, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, optronique, mathématiques et leurs applications...

■ Compétences technologiques : informatique, analyse, mesure et contrôle, procédés techniques.

■ Pôles de compétitivité : System@tic (Île-de-France) ; Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : réacteurs nucléaires de 3^e génération ; contrôle-commande des réseaux et de la puissance ; sécurité active des véhicules ; architecture électrique des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; systèmes aériens automatisés ; gestion des flux de véhicules ; outils et méthodes pour le développement logiciel ; ingénierie des systèmes embarqués ; com-

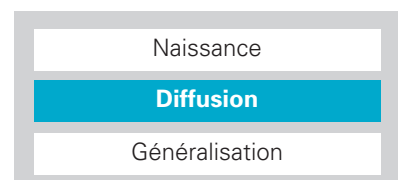
posants et systèmes logiciels ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus ; acquisition et traitement de données ; interfaces homme-système ; modélisation, simulation, calcul ; contrôle de procédés par analyse d'image ; capteurs intelligents et traitement du signal ; méthodes et outils de coconception.

■ Principaux acteurs français

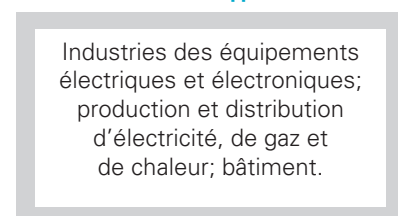
Centre de compétences : Polytechnique, ENS Ulm, université d'Evry-LSC, Cemagref. Industriels : Thales, Renault, PSA Peugeot-Citroën, Dassault, Areva, Atos Origin, Alstom, Airbus, EADS...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Boeing (États-Unis), IBM (États-Unis), Microsoft (États-Unis), Cisco (États-Unis), Samsung (Corée du Sud), Toshiba (Japon), Sony (Japon), NTT (Japon),...

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies et méthodes de production



83. Transfert de technologie

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Technologie organisationnelle par excellence, le transfert de technologie consiste en un échange de savoir, de techniques ou de savoir-faire d'une organisation à une autre. La diffusion dans le tissu industriel des résultats de recherche publique (laboratoires, universités) est la dimension principale du transfert de technologie. Pour être complet, il convient également de citer le transfert international de technologie, souvent d'une entreprise à une autre, dans le but de prendre pied sur un marché.

Le transfert de technologie ne s'improvise pas. Il nécessite l'utilisation d'un certain nombre d'outils tels que ceux nécessaires pour :

- l'élaboration de la stratégie : analyse du marché potentiel (segments, volumes, dynamisme...);
- l'identification des éléments constitutifs de la technologie objet du transfert ;
- l'analyse de la propriété intellectuelle : marque, droit d'auteur, savoir-faire, dessins et modèles, brevets ;
- la caractérisation du cadre réglementaire et juridique ;
- la recherche et l'identification des licenciés potentiels (dont le « licencié idéal ») ;
- le choix du type de transfert de technologie adapté au contexte et aux objectifs : cession de brevet, concession de licence, communication de savoir-faire, projets de R&D en partenariat, accords de coopération technique, formation, création de joint-ventures, création de spin offs, rachat d'entreprises... ;
- le calcul de la valeur économique du transfert. Ce calcul peut typiquement être fondé sur une combinaison des méthodes suivantes : coûts (historiques de R&D, futurs de R&D, transfert, propriété intellectuelle), potentiel de revenus (marché, marges...),

rentabilité des capitaux investis... ;

- l'ingénierie financière du transfert.

Un des facteurs clés de succès du transfert de technologie réside dans l'ingénierie, et la mise en œuvre coordonnée et multidisciplinaire des outils précédents.

Enjeux, Impact

En 1998, Henri Guillaume rendait les conclusions d'une mission sur la politique en faveur de la technologie et de l'innovation où l'on pouvait lire : « *Notre pays dispose d'un potentiel scientifique et technologique de premier plan, mais le couplage de ces découvertes et de ces connaissances avec les activités industrielles s'effectue moins facilement qu'aux États-Unis et au Japon.* » Force est de constater que ce constat reste d'actualité.

Il serait hasardeux de chiffrer l'impact qu'aurait une augmentation des transferts de technologies entre acteurs publics et privés, tout au plus peut-on raisonner par analogie et observer ce qui se passe ailleurs.

Les experts s'accordent à reconnaître que la situation actuelle de la recherche académique française est comparable à celle des États-Unis dans les années 1980. À cette époque, le gouvernement fédéral américain possédait 28 000 brevets, dont moins de 5 % étaient exploités. Grâce au *Bayh-Dole Act*, adopté en décembre 1980, et permettant aux universités d'exploiter à leur compte les résultats de recherches financées par les agences fédérales et exécutées dans leurs laboratoires, elles peuvent déposer des brevets, en garder la propriété intellectuelle, gérer le transfert de technologie et utiliser les revenus correspondants pour financer leurs recherches. Le *Bayh-Dole Act* a permis une croissance forte des prises de brevets et de la commercialisation d'un grand nombre

Technologies et méthodes de production

de nouvelles technologies. Il a également entraîné une mutation fondamentale dans la pratique de la recherche académique, avec la formation dans toutes les grandes universités américaines de *Technological Transfer Offices* qui vont jouer un rôle majeur dans l'orientation même de la recherche et dans la mise en place des partenariats avec les entreprises privées.

Alors que le PIB par habitant de la France (et de l'Europe continentale) rattrapait celui des États-Unis dans les années 70, force est de constater que la tendance s'est largement inversée. Le transfert de technologie et l'innovation y ont largement contribué.

Le transfert de technologies entre entreprises, notamment international, est quant à lui un atout dans la compétition internationale, dans la mesure où il permet de générer des revenus tout en exportant des standards, des méthodes, plus généralement une culture industrielle.

Prenant conscience de l'importance des enjeux, la Commission européenne a lancé en septembre 2005 une consultation pour la création d'un Institut européen de technologie, dont l'objectif *a priori* est de dynamiser la coopération entre les chercheurs et les entreprises.

Marché

La France souffre globalement d'une insuffisance en matière de transfert de technologie :

- les laboratoires publics, les entreprises et les financeurs n'entretiennent pas les relations de « connivence » indispensables ; nombre d'inventions des laboratoires publics ne sont jamais transférées dans le tissu industriel. Un meilleur transfert de technologie des laboratoires vers les entreprises contribuerait à rapprocher la France des « objectifs de Lisbonne » (3 % du PIB investis en R&D) ;
- le transfert international de technologie, levier déterminant pour la conquête de positions sur les marchés export, n'est que trop rarement utilisé. Cette insuffisance explique, en partie, la dégradation structurelle de la balance du commerce extérieur.

Acteurs

Le rapport d'Henri Guillaume identifie en tant

que « maillons faibles » du dispositif national en faveur de la recherche technologique et de l'innovation :

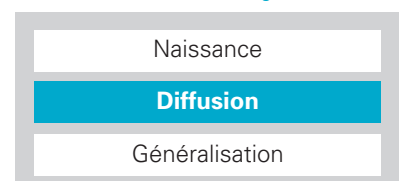
- « *le cloisonnement encore marqué entre l'enseignement supérieur et les organismes de recherche, entre les organismes de recherche eux-mêmes, entre les universités et les écoles d'ingénieurs* » ;
- « *l'insuffisance des investissements en capital-risque, qui couvrent encore mal les premiers stades de la création d'entreprise de technologie* » ;
- « *la complexité du dispositif de transfert et de diffusion de la technologie, qui reste peu lisible pour les PME* ». Le nombre d'acteurs publics ou parapublics du transfert de technologie est en effet important en France : SAIC (services d'activités industrielles et commerciales) des universités, RDT (réseaux de développement technologique), CRITT (centres régionaux d'innovation et de transfert de technologie), CTI (centres techniques industriels), CNRT (centres nationaux de recherche technologique), CEEI (centres européens d'entreprises et d'innovation), Oséo-Anvar, Drire, incubateurs, technopoles, pôles de compétitivité... auxquels viendront s'ajouter les labels « instituts Carnot ».

Des acteurs privés se positionnent également sur le marché du transfert de technologie :

- les investisseurs en capital (AFIC, Association française des investisseurs en capital - www.afic.asso.fr) ;
- les structures de recherche contractuelle, regroupées pour la plupart au sein de l'ARSC (Association des structures de recherche contractuelle - lasrc.net) ;
- les cabinets de conseil spécialisés, tels Vaucher-Tisseront, Développement et Conseil, Nodal, Goyhenetche, Erdyn... Certains de ces cabinets sont adhérents de l'Unatrantec (Union nationale des consultants en innovation et en transfert de technologie - www.unatrantec.asso.fr).

Le réseau européen IRC (*Innovation Relay Centre*) est également spécialisé dans le transfert de technologie, avec des relais locaux (irc.cordis.lu). L'association TII (*Technology Innovation Information* - www.tii.org) regroupe les acteurs du transfert de technologie au niveau européen.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les grandes tendances technologiques mises en avant par ce travail de prospective technologique

Au-delà de la description des 83 technologies clés, quelques grandes tendances technologiques ont été mises en évidence par les experts des différents groupes de travail.

Des technologies déjà « connues »

Nombre de technologies que l'on peut qualifier d'« anciennes » figurent parmi les 83 technologies clés 2010. Elles répondent à des enjeux majeurs et contribuent à la compétitivité de la France. Ces technologies, même si elles sont déjà bien « connues », ont insuffisamment progressé ces dernières années, notamment parce que les acteurs ont relâché leurs efforts en raison des prix bas de l'énergie et des matières premières : l'identification de ces technologies comme étant des technologies clés permet d'attirer l'attention sur leur potentiel d'évolution et les enjeux associés. C'est, par exemple, le cas des pompes à chaleur, des moteurs à pistons, des turbomachines, du traitement de surface.

Des technologies de niveau système et des technologies génériques

Partant des grands enjeux économiques et des besoins sociétaux, l'étude a retenu les technologies qui répondent le mieux à ces enjeux et besoins. Il s'agissait, dans un contexte d'intense compétition entre pays, d'identifier des technologies différenciantes pour l'attractivité et la compétitivité françaises. Or, il apparaît qu'un nombre croissant de pays, y compris émergents, maîtrisent des « briques » technologiques, voire sont les leaders mondiaux sur ces « briques » (composants électroniques, écrans plats...). Dans un tel contexte, les pays occidentaux, et la France en particulier, ne peuvent rester compétitifs qu'à la condition de mettre en avant leur maîtrise des systèmes complexes.

En conséquence, la liste des technologies clés 2010 est numériquement plus restreinte que les listes des exercices précédents : 136 technologies clés pour le premier exercice et 119 technologies clés pour le second. Les 83 technologies clés 2010 recensent plus de technologies de niveau « système » : ces technologies incluent de nombreuses « briques » technologiques pouvant être développées ailleurs qu'en France.

Par ailleurs, dans la même optique, il est apparu pertinent de retenir comme clés des « famil-

les » ou des ensembles de technologies - que l'on peut qualifier de « génériques » -, plutôt que de sélectionner des technologies trop spécifiques. C'est ainsi que certaines technologies clés, telles que les matériaux pour l'électronique et la mesure, la gestion de la microénergie, la gestion de l'énergie à bord des véhicules, sont relativement « ouvertes ». À partir de ces technologies clés génériques, il appartient à l'homme de l'art (chercheur, ingénieur) d'élaborer des solutions aux problèmes spécifiques qui lui sont posés.

Des technologies largement diffusantes

Pour des raisons de présentation et de lisibilité, les technologies clés sont présentées suivant des thématiques traditionnelles (TIC, Matériaux-chimie, Bâtiment, Énergie...). Ce classement ne doit pas être considéré de façon « hermétique ». Nombre de technologies sont en effet diffusantes et concernent différents secteurs industriels, comme les technologies de l'énergie, des TIC, des matériaux, ou encore celles contribuant aux différentes dimensions de la sécurité (traçabilité, authentification, RFID). Cette « transversalité » est parfois explicite dans le titre même de la technologie (intégration des ENR dans le bâtiment) mais, généralement, il convient de ne pas s'arrêter au titre et de lire la fiche pour connaître les différentes applications (voir, par exemple, les fiches interface humain-machine, criblage et synthèse à haut débit, turbomachines, capteurs intelligents).

Les technologies clés et les externalités sociales et environnementales

Dans les économies développées de ce début de XXI^e siècle, les exemples d'externalités (situation économique dans laquelle l'action d'un agent économique influe positivement ou négativement sur un autre agent, sans contrepartie financière) négatives sont nombreux :

- ponction sur l'eau et pollution diffuse engendrée par les activités agricoles ;
- pollutions (air, bruit) et contribution aux émissions de gaz à effet de serre des transports ; en plus, pour le cas des transports routiers, congestion et morts sur les routes ;
- charge sur la collectivité des dépenses de soins, même dans les cas où le besoin de soins résulte d'une absence de prévention ou d'une mauvaise hygiène de vie (alimentation, alcool, tabac) ;
- nuisances visuelles, olfactives et sonores engendrées par certains complexes industriels ;
- dégradation de l'environnement électromagnétique engendrée par la multiplication des antennes relais des réseaux de téléphones cellulaires ;
- etc.

Marquant en cela une évolution forte, l'étude *Technologies clés 2010* propose de nombreuses technologies qui permettent de réduire et/ou de « monétariser » les externalités négatives. Plusieurs technologies du domaine de l'énergie et de l'environnement, de l'alimentation, des transports répondent à la préoccupation de la réduction de ces externalités. De même, reposant largement sur l'usage des TIC, des solutions sont proposées pour la monétarisation de ces externalités : il s'agit notamment des technologies qui permettent une tarification à l'usage. Le positionnement et l'horodatage ultraprécis, les infrastructures routières intelligentes ou les technologies de gestion des flux de véhicules, associés aux technologies des télécommunications et du traitement des données, peuvent constituer la « boîte à outils » des autorités et des gestionnaires d'infrastructures pour instaurer, par exemple, des péages urbains ou réguler le trafic sur les axes routiers les plus saturés.

L'importance de la normalisation

Pour un nombre relativement élevé de technologies clés, la normalisation apparaît comme un élément essentiel de la diffusion de ces technologies dans le tissu industriel et comme un facteur de compétitivité des entreprises qui auront su infléchir la normalisation vers leur propre standard.

À l'origine, la construction des normes s'est bâtie en aval de la technique. L'enjeu était d'élaborer *a posteriori* des références et un langage commun afin de favoriser l'interopérabilité, l'interchangeabilité, la compatibilité des équipements sur des domaines techniques matures. La norme permettait d'entériner les meilleures pratiques en y intégrant une dose de retour d'expérience et de réduire la variété en harmonisant des éléments dont la dispersion devenait contraignante ou coûteuse. Les normes de spécifications des matériels dans les domaines électriques ou mécaniques illustrent parfaitement cette logique qui était souvent issue de l'histoire même des technologies (voir l'exemple de l'écartement des voies de chemins de fer).

Désormais, une nouvelle logique d'élaboration des normes tend à supplanter la logique *a posteriori*, en plaçant cette élaboration en amont du déploiement de la technologie. Cette logique est motivée par le fait que, pour rentabiliser des coûts de développement toujours plus élevés, les entreprises aspirent à des normes communes, de plus en plus souvent à l'échelle de la planète. Celles-ci sont en effet la garantie que le marché disposera d'une taille critique.

Établir une norme *a priori*, c'est éviter l'élaboration de référentiels concurrents avec pour corollaire une atomisation de l'offre. C'est aussi s'offrir une possibilité de valorisation et de promotion des innovations ou encore de réduire le risque que des utilisateurs se tournent vers une solution concurrente.

Si cette logique *a priori* conduit à une course de plus en plus effrénée pour conquérir le terrain suffisamment vite pour imposer une technologie qui deviendra une référence indispensable pour une majorité d'utilisateurs, le processus de normalisation est un puissant outil de capitalisation de la connaissance. Ainsi, dans tous les pays industriels, accéder au corpus normatif, c'est accéder au cadre de référence de l'information technique dans tous les secteurs de l'économie et de la technique. Connaître les normes en préparation, c'est également se doter d'une capacité d'anticipation pour préparer son analyse prospective pour imaginer de nouveaux produits, façonner de nouveaux concepts.

La participation à l'élaboration des normes, loin d'être une perte de temps, doit s'appréhender comme un moyen de renforcer la compétitivité de son entreprise.

Les limites de l'étude

La méthodologie de l'étude a conduit à une liste de 83 technologies clés. Élaborée à partir du travail de plus de cent experts, cette liste n'aurait pas été fondamentalement différente si d'autres experts avaient été sollicités. Les critères de sélection des technologies clés ont été choisis pour répondre, au mieux, à la question posée : identifier les technologies susceptibles de procurer à la France un avantage de compétitivité et d'attractivité. Aussi, toutes les technologies importantes pour la France, dans les différentes acceptions possibles du terme, ne figurent pas dans cette liste :

- certaines technologies relatives au domaine de la défense nationale, dont la maîtrise est considérée comme critique pour répondre aux besoins spécifiques de ce domaine, n'appar-

raissent pas, comme la détection et l'analyse NRBC (nucléaire, radiologique, biologique, chimique), les piles à combustibles pour sous-marins, certains matériaux haute température ou les technologies de missiles ;

- certaines technologies annoncées comme devant apporter une véritable rupture, mais pour lesquelles de trop nombreux verrous ne seront pas levés à l'horizon de temps de l'étude, n'ont pas été retenues. Le cas de la pile à combustible illustre ces propos. Pour des applications stationnaires ou de transport, mettant en jeu des puissances de quelques dizaines à quelques centaines de kW, les verrous sont encore si nombreux (disponibilité de catalyseurs, platine ou autre, en quantité suffisante, tenue au vieillissement et au cyclage, logistique de l'hydrogène, analyse du cycle de vie global de l'hydrogène...) que les experts n'ont pas considéré cette technologie comme pouvant être clé à l'horizon 2010. Ce qui n'empêche pas de considérer sérieusement des applications de niche, telles que la gestion de la microénergie ;
- des technologies certainement clés à long terme, comme le nucléaire de 4^e génération, le photovoltaïque « organique » (polymères remplaçant le silicium), la géothermie des roches chaudes fracturées, la fusion nucléaire, les nanorobots médicaux injectables, les ordinateurs quantiques n'ont pas été retenues car leur développement va au-delà de l'horizon calendaire de l'étude.

Même si ces technologies ne figurent pas dans la liste arrêtée par les experts, cela ne signifie pas qu'il faille les laisser pour compte. Les résultats de tout exercice de prospective sont tributaires du référentiel choisi (questions que l'on se pose, horizon de temps visé, ...).

De plus, quelles que soient les précautions méthodologiques mises en œuvre, les études de prospective sont conduites par des hommes et des femmes qui restent, malgré tout, influencés par les préoccupations de l'époque. Ainsi a-t-on pu reprocher à l'étude *Technologies clés 2005*, réalisée en pleine « bulle » Internet, un poids relatif trop important accordé aux TIC et autres « e-technologies ». L'Histoire dira si l'étude *Technologies clés 2010* a été trop influencée par la prise de conscience de l'impact négatif des activités humaines sur l'environnement et par les tensions apparues sur certaines matières premières stratégiques, comme le pétrole ou certains métaux.

Les suites possibles de l'étude Technologies clés 2010

L'exercice technologies clés offre un référentiel et un outil de réflexion qui, comme tout outil, doit évoluer et demande des développements additionnels. Plusieurs experts et membres du comité de pilotage ont appelé de leurs vœux les prolongements, que nous esquissons ci-après et qui représentent, pour chacun, une étude en soi (étude qui permettrait d'approfondir l'analyse des problématiques soulevées).

Les technologies clés et l'Europe

Le premier de ces prolongements, dans la perspective du démarrage, en 2007, du 7^e PCRD, pourrait consister à ancrer les 83 technologies clés dans la dimension européenne. Certes, cette dimension a été largement prise en compte tout au long de l'étude : les ressources bibliographiques exploitées, la présence au sein du comité de pilotage d'un représentant de la Commission l'attestent. Les experts sollicités avaient tous à l'esprit la dimension européenne.

Publiée en septembre 2005 par la Commission européenne, l'étude *Key Technologies for Europe* mériterait d'être analysée à travers le prisme de *Technologies clés 2010*. Il est toute-

fois possible d'aller plus loin, notamment en faisant se rencontrer les experts des deux initiatives, en identifiant des pays leaders sur des technologies spécifiques, en fondant sur les technologies clés identifiées des réseaux et des projets d'innovation à l'échelle européenne.

Les technologies clés, les régions et les pôles de compétitivité

Le démarrage de l'étude *Technologies clés 2010* a coïncidé avec le lancement de l'appel à projets du Gouvernement pour les pôles de compétitivité. À ce jour, 66 pôles de compétitivité ont été labellisés. La politique des pôles de compétitivité est aujourd'hui centrale dans le soutien public à l'innovation. Il a donc paru utile de proposer aux utilisateurs de l'étude une articulation entre les 83 technologies clés et les 66 pôles de compétitivité. Aussi chaque fiche technologie clé contient, dans la partie consacrée aux acteurs, une rubrique « pôles de compétitivité ».

À la lecture des fiches, on constate que la plupart des technologies clés se retrouvent dans un à cinq pôles, alors que huit technologies clés⁽¹⁾ ne sont rattachées à aucun pôle, et que vingt technologies clés sont liées à six pôles ou plus.

Ce constat appelle deux remarques :

- les technologies de niveau « système » ont besoin de « briques » technologiques développées dans différents pôles de compétitivité, ce qui explique que vingt technologies clés ont des liens avec six pôles ou plus. Le risque de l'implication d'un trop grand nombre d'acteurs pourrait toutefois résider dans l'absence de leadership clair sur les technologies clés concernées ;
- inversement, le fait que huit technologies clés ne soient portées par aucun des 66 pôles labellisés mérite une certaine attention. Il conviendra probablement d'orienter les futurs appels à projets de pôles vers ces technologies, afin d'affirmer leur ancrage territorial.

Globalement, il apparaît nécessaire de mieux articuler les pôles de compétitivité et les technologies clés, afin de favoriser l'émergence de pôles clairement leaders sur chaque technologie clé et aussi d'éviter (ou d'assumer) les technologies clés « orphelines » de pôle. Cette analyse doit être naturellement liée aux futures « déclinaisons » régionales des technologies clés qui pourraient être mises en œuvre sous l'égide des Drire, avec le concours des acteurs régionaux de l'innovation.

317

Les technologies clés, les « systèmes clés » et les « filières clés »

Tout comme avec les pôles de compétitivité, les technologies clés s'articulent avec une autre initiative gouvernementale : les grands programmes d'innovation industrielle de l'Agence pour l'innovation industrielle (All). La contribution de l'étude Technologies clés à la définition des axes de travail de l'All s'exprime, notamment, au travers du concept de « systèmes clés ». Sans prétendre à l'exhaustivité, quelques systèmes clés peuvent être proposés à ce stade : réacteur nucléaire de 3^e génération, réseau électrique de transport et de distribution avec production décentralisée, écobâtiment, système agricole « intelligent », réseau ferré « ouvert », TGV 350 km/h silencieux, avion économe et silencieux (post A320), lanceur spatial à coût optimisé, contrôle aérien automatisé, véhicule routier automatisé, système routier intelligent, navire nouvelle génération, système de transports urbains plus rapides, réseau de données très haut débit mobile à bas coût, usine à logiciels, dispositif portable à autonomie augmentée, plate-forme industrielle énergétiquement efficiente...

(1) Il s'agit de : gestion de l'air dans le bâtiment ; gestion de l'eau dans le bâtiment ; capture et stockage géologique du CO₂, mesure des polluants de l'eau ; technologies physiques en amont du traitement de l'eau ; automatisation du tri des déchets ; accélération de la dégradation des déchets fermentescibles ; traitement des odeurs non confinées.

L'approfondissement de ce type d'analyse conduira à recenser les technologies clés nécessaires pour chacun des systèmes clés, en intégrant, en particulier, la dimension européenne. Un autre résultat périphérique de l'étude a été la mise en évidence de plusieurs filières, que nous qualifierons également de clés. L'approche par filière permet de caractériser finement les tenants et les aboutissants de l'environnement d'un produit. Elle permet de mettre en évidence les points forts et les points faibles du système, les acteurs qui interviennent directement ou indirectement dans le système, les synergies, les effets externes, les coopérations, les goulets d'étranglement, les liaisons entre secteurs, le degré de concurrence et de transparence des différents niveaux d'échanges, la progression de la création de valeur tout au long de la filière.

Il s'agit, là, d'un vaste sujet. L'analyse fine de ces filières permettrait de proposer des actions à mener pour renforcer les points forts positifs et estomper les faiblesses. L'articulation entre technologies et filières clés devrait s'appuyer sur les acteurs d'ores et déjà identifiés pour les technologies clés. Quelques filières « candidates » ont émergé lors des débats entre experts : accumulateurs et batteries, combustibles nucléaires, biocarburants, électronique de puissance (silicium, carbure de silicium, diamant), moteurs électriques, matériaux nanostructurés et nanocomposites (dont nanotubes de carbone), biomatériaux (dont bois), filières intégrées de recyclage-réutilisation... Une analyse plus poussée permettrait de conforter et d'enrichir cette liste encore très liminaire.

La mise à jour de l'étude

La dynamique technologique ne s'arrête jamais. Depuis 1995, les exercices Technologies clés ont conduit à une forte mobilisation d'experts durant quelques mois, puis les réseaux constitués pour l'occasion se sont dispersés. Tout au long de l'étude, cette question de la pérennisation des réseaux d'experts a été évoquée, et notamment lors de la réunion « plénière » qui s'est tenue à Bercy, en octobre 2005.

Il ressort de ces débats un fort consensus pour une mise à jour « en continu » de l'étude. Sur le plan pratique, l'environnement technologique mis en œuvre pour le site internet (www.tc-2010.fr) paraît tout à fait adapté à une mise à jour en continu des technologies clés. Toutefois, l'expérience montre qu'une évolution et une animation de ce site sont indispensables pour que ce site « vive ». Cela suppose, notamment, une promotion du site en direction des PME, la tenue à jour de la liste des accès (identifiant, mot de passe), la diffusion périodique d'une « lettre des technologies clés », la diffusion « d'alertes » personnalisées aux experts en cas de contribution dans leur domaine de compétence, etc.

De plus, la constitution d'un « noyau dur » d'experts se réunissant à une fréquence à définir (typiquement deux fois par an) est souhaitable. Par ailleurs, il paraît indispensable de faire vivre le vivier des experts par admission de nouveaux membres ou en actant le retrait de ceux qui ne souhaitent ou ne peuvent plus se mobiliser.

Lors des débats, il est apparu essentiel que cette mise à jour en continu laisse la place à des « temps forts » qui seraient l'occasion d'une large communication vers les acteurs de l'économie et le public. Ces actions de communication pourraient se dérouler tous les deux ans. Le « portage » politique de l'ensemble de cette démarche est également indispensable pour une large adhésion du corps social à l'appropriation des résultats de ces travaux.

Le présent rapport a tenté de restituer, aussi fidèlement que possible, les contributions de la centaine d'experts qui se sont mobilisés pour le succès de l'étude *Technologies clés 2010*, sans oublier les contributions déposées sur le site Internet et les interviews effectuées tout au long de l'étude. Le résultat de ce travail collectif a vocation à être largement diffusé, discuté et critiqué.

ANNEXES

Annexe 1 - Liste des participants au projet

Comité de pilotage

André Lebeau	Président du Comité de pilotage
Agnès Arcier	Minefi/DGE/SPIC
Philippe Boone	Mindef/DAS/SDTP
Hervé Bossuat	Maapr/DGER
Philippe Bourgeois	Minefi/DGE/SPIC
Alain Bravo	Supélec
Antoine Chevet	Hermès
Laurent De Mercey	Rnrt
Elie Faroult	Commission européenne
Paul Friedel	France Télécom
Pierre Georget	Hutchinson
Patrick Haouat	Erdyn
Jean-Pierre Henninot	Minefi/DGE/STSI
Philippe Hirtzman	Commissariat général du plan
Olivier-Pierre Jacquotte	Mindef/DGA
Véronique Lamblin	Futuribles
Richard Lavergne	Minefi/DGEMP
Marcel Lebadezet	Areva
Sami Louati	Minefi/DGEMP
Antoine Masson	Agence nationale de la recherche
Caroline Mischler	MINEFI/DGE/SPIC
Dominique Namur	Commissariat général du plan
Christian Ngo	Ecrin
Jean Nunez	RNRT
Christophe Alexandre Paillard	Mindef/DAS/SDTP
Nicolas Petit	Oséo-Anvar
Grégoire Postel-Vinay	Minefi/DGE/OSI
Claude Ricaud	Schneider Electric
Pierre Rolin	France Télécom
Lionel Segard	Inserm Transfert
Ronan Stephan	CNRS
Pascal Stievenard	Midef/DGA
Jacques Thernier	Minefi/DGE/SIMAP
Jacques Theys	Ministère de l'Équipement

Équipe projet

Consultants

Patrick Haouat	Erdyn
Lionel Algarra	Erdyn
Stéphane Boudin	Erdyn
Justine Derenaucourt	Erdyn
Michel Duhamel	Erdyn
Louis Drouot	Erdyn
Olivier Fallou	Erdyn
Hélène Jacquet	Erdyn
Geoffrey Delcroix	Futuribles
Céline Laisney	Futuribles
Véronique Lamblin	Futuribles
Clément Bourrat	Cybion
Guillaume Lory	Cybion
Calixte Cauchois	Virtuoz
Joël de Rosnay	Biotics

Maîtrise d'ouvrage

Philippe Bourgeois	Minefi/DGE/SPIC - chef de projet
--------------------	----------------------------------

Groupes de travail

Groupe méthode

Khaled Bouabdallah	Université Saint-Etienne
Philippe Bourgeois	Minefi/DGE/SPIC
Alain Bravo	Supélec
Yann Cadiou	Observatoire des sciences et techniques
Thomas Chaudron	Centre des jeunes dirigeants
Nicolas Chung	Association des régions de France
Philippe Clerc	Assemblée des chambres françaises de commerce et d'industrie
Michel Combarrous	Académie des technologies
Philippe Daulouede	Sénat
Christian David	L'Expansion
Geoffrey Delcroix	Futuribles
Samuel Douette	Centre des jeunes dirigeants
Maïte Errecart	Institut national de la consommation
François Gérard	Oséo-Anvar
Valérie Guigue Koeppen	Minefi/DGE/SPIC
Patrick Haouat	Erdyn
Mohamed Harfi	Commissariat général du plan
Hélène Jacquet	Erdyn
Véronique Lamblin	Futuribles
Bernard Legendre	Assemblée des chambres françaises de commerce et d'industrie
Lam Fung Ly	Mindef/DGA
Edouard Mathieu	Agence française pour les investissements internationaux
Catherine Moal	L'Usine Nouvelle

Denis Randet
Yves Robin
Alice Wu
Philippe Zenatti

ANRT
Sessi
Commission européenne
Minefi/DGE/SPIC

Services de base

Jean Bonal
Stéphane Boudin
Daniel Clément
Robert Cope
Jérôme de Dinechin
Bruno de Latour
Jean-Jacques Doyen
Louis Drouot
Gilles Goaer
Marcel Lebadezet
Jean Lucas
Gines Martinez
Jean Claude Mogniot
Frédéric Muttin
Christian Ngo
Claude Ricaud
Guy Sarre
Jacques Varret

Ecrin
Erdyn
Ademe
CSTB
Serras Thermoélectricité
MDF
Suez
erdyn
Photowatt
Areva
Cnam
Réseau CTI
CEA
EIGSI
Ecrin
Schneider Electric
Saft Batteries
BRGM

Besoins quotidiens

Valérie Brunel
Geoffrey Delcroix
Jean-Marie Depond
Justine Deregnacourt
Michèle Durand
Catherine Esnouf
Patrick Haouat
Louis-Marie Houdebine
Michelle Jarrigeon
Mark Lathrop
Éric Seuillet
Jean-Daniel Sraer
Nicolas Tannières
Isabelle Vallée
Jean-Pierre Vors
Ariane Voyatzakis
Françoise Xavier

Biodecision
Futuribles
ARIIT Centre
Erdyn
Centre national de génotypage
Inra
Erdyn
Inra
R2ITH
Centre national de génotypage
E-Mergences
Académie nationale de médecine
Oséo-Anvar
Oséo-Anvar
Bayer Cropscience
Oséo-Anvar
Ecrin et CNRS

Se déplacer

Virginie Augereau
Jacques Beaumont
Jacques Biais
Jean Bonal
Gérard Cambillau
Robert Csukai
Pierre Darrort

RATP
Inrets
Indicta
Ecrin
SNCF
Oséo-Anvar
RATP

Victor Deletang
 Patrice Desvallées
 Yan Georget
 Jean François Gruson
 Patrick Haouat
 Éric Jacquet-Lagrèze
 Laurent Jourdainne
 Alain Jullien
 Céline Laisney
 Christophe Lèbre
 Gérard-Marie Martin
 Christian Ngo
 Anne-Marie Roy
 Patrick Savourey

Fiev
 DPAC
 Koalog
 IFP
 Erdyn
 Eurodecision
 Arianespace
 Alstom Transport
 Futuribles
 ADP
 Valéo
 Ecrin
 Gifas
 Accor

Communiquer

Bruno Arnaldi
 Alain Carencio
 Benoît Crespin
 Guy Dadou
 Philippe Darche
 Joël de Rosnay
 Alain Dechatre
 Gabriel Dib
 Stéphane Elkon
 Hervé Fanet
 Frédéric Giron
 Marc Idelson
 Hélène Jacquet
 Christian Jegourel
 Didier Juvin
 Laurent Kott
 Michel Le Quentrec
 Jean-Luc Leray
 Jean-François Perret
 Jean-Paul Pinte
 Ramesh Pyndiah
 Ivan Roux
 Christophe Schlick
 Philippe Silberzahn
 Alan Zeichick

Irisa
 Alcatel
 LMSI - université de Limoges
 Creativ
 LIP6
 biotics
 CEA
 Luceor
 Alliance Tics
 Leti
 Piere Audouin Conseil
 BNP Paribas
 Erdyn
 Edgecall
 CEA-LIST
 Inria
 Météo France
 CEA
 CNISF
 Université catholique de Lille
 ENST Bretagne
 Micro Hebdo
 Université Bordeaux 2 (Victor Segalen)
 Digital Airways
 Software Development Times

Semi-produits

Lionel Algarra
 Daniel Bernard
 Michel Bonnemaïson
 Jean-Marie Dubois
 Sylvie Dumartineix
 Éric Gaffet
 Daniel Gomez
 Jean HANUS
 Jean Jenck

Erdyn
 Arkema
 BRGM
 Mines de Nancy
 Oséo-Anvar
 CNRS
 Atip
 CEA
 Enki Innovation

Véronique Lamblin	Futuribles
François Laval	CEA
Jean-Claude Lehmann	Saint Gobain
Gines Martinez	Réseau CTI
Dominique Quiniou	BRGM
Francis Teyssandier	CNRS
Véronique Thierry-Mieg	Ecrin
Albert Truyol	CNISF
Michel Vernois	CTBA

Équipements, process et méthodes de production

Jean-Marc Aublant	LNE
Nicolas Beaude	Innovprocess
Christian Caremoli	EDF
Philippe Contet	UNM-FIM
Pierre Devalan	Cetim
Louis Drouot	Erdyn
Céline Dupont-Leroy	Aritt Centre
Benoît Eynard	UTT-LASMIS
Olivier Fallou	Erdyn
Jean-Pierre Gex	Ecrin
Krassimir Krastev	Optics Valley
Jean-Paul Papin	Cetim
Didier Pellegrin	Schneider Electric
Thien-My Phan	Oséo-Anvar
Jean-François Somme	Acmel Industries
Georges Taillandier	AFPR
Arnaud Tanguy	Legris
Serge Ungar	PopSud

Fonctions support

Michel Duhamel	Erdyn
Geoffrey Delcroix	Futuribles
Marc Idelson	BNP Paribas
Thierry Dian-Flon	Crédit Agricole Immobilier
Arlette Mazin	Cnes
Christian Jegourel	Edgecall
Armanda Pais	France Télécom R&D
Philippe Cahen	Opto Opus
Francis Bourrières	Prooftag
Henri Hemery	Thales
François Rivard	Unilog

Outils d'aide à la réflexion

Patricia Auroy	INRA
Bernard Buisson	France Télécom
Calixte Cauchois	Virtuoz
Michaël Denis	ADEV
Jean-Luc Hannequin	Creativ
Patrick Haouat	Erdyn
Patrice Heyde	CCI Rhône-Alpes
Gérard Husson	Mime

Christophe Lèbre
Guillaume Lory
Olivier Nérot
Fabrice Rigaux
Bernard Rosenzweig
Louis Vedier

ADP
Cybion
Social Computing
Crocis-CCIP
Aritt-RDT Centre
AFIC

Acteurs régionaux

Alsace

Séverine Anquetil
Alain Beretz
Christian Blum
Jean Pierre Chambard
Alain Dereux

Francis Fischbach
Mathilde Follonier
Jean Paul Gaufillet
Roma Grzymala
Patricia Hautesuer
François Henne
Pascale Laurain
Carmen Muller
Béatrice Payen
Alain Strasser
Jean Luc Tourmann
Jérôme Vanmackelberg
Tima Wendling

Conseil régional Drest
Université Louis Pasteur
Conseil régional (Deco)
Critt Holo3
Chambre de commerce et d'industrie
Sud-Alsace-Mulhouse
DRRT
Iconoval
Irepa Laser
Rhenaphotonics
Ada
Semia
DRRT
Réseau technologique d'Alsace
Oséo-Anvar Alsace
Critt Aerial
Coinseil régional (Drest)
Dire Alsace
CCI de Colmar et du Centre-Alsace

Centre

Daniel Barbereau
Jean Pierre Becquet
Erik Bentz
Sébastien Besson
Yolande Boudard
Daniel Carton
Arnaud Catinot
Jean-Marie Depont
Gérard Dequevauviller
Claude Fleurier
Serge Gasnier
Valérie Harel
Christophe Lambert
Sébastien Limousin
Claude Marchand
Michel Mesnier
Patrick Parayre
Corinne Pauly
Bernard Rosenzweig
Claude Sautour

John Deer
Dire Centre
CCI de Touraine
Orléans Technopole
Conseil régional du Centre
Hyginov
Arist-CRCI Centre
Aritt Centre
Cetim-Certec
DRRT
Cresitt Industrie
Plate-forme technologie
CCI Eure-et-Loire
Dire Centre
Dire Centre
CCI Loir-et-Cher
Oséo-Anvar Centre
CCI Loir-et-Cher
Aritt-RDT Centre
Oséo-Anvar Centre

Claude Untrehalt
Michel Villard

CCI de l'Indre
CCI du Loiret

Nord-Pas-de-Calais

Anne Beauval
Marie Bechtet
Cyril BernardeRNARDE
Patrick Bertolo
Jean Claude Carlu
Arnaud Cichowski
Olivier Declerk
Gaétan Mairesse
Patrick Orlans
Chantal Pierrache
Jean Marie Pruvot
Julien Tognola
Christian Traisnel
Christian VINCO

École des Mines
Ciel
Drire Nord-Pas-de-Calais
Digiport
Oséo-Anvar Nord-Pas-de-Calais
Conseil régional (service recherche)
IEMN Transfert
DRRT
Cetim
Conseil régional (DAE)
RDT
Drire Nord-Pas-de-Calais
Centre de développement des éco-entreprises
Drire Nord-Pas-de-Calais

Rhône-Alpes

Bérengère Fournel
Gilles Rouchouse
F. Wendling
E. Filliol
B. Micand
O. Whitechurch
M. Barq
H. Montes
David Pigot
Gérard Goubault de Brugères
Bertrand Georjo
Marc Rohfritsch
Philippe Sauvage
Jean-Marie Lemahieu
Emmanuel Cantèle

Présence Rhône Alpes
Cetim
Aratem
Oséo-Anvar Rhône Alpes
Arteb
Arteb
Pôle européen de plasturgie
Conseil régional
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes

Annexe 2 – Bibliographie sommaire

Documents transversaux aux secteurs d'activité

- European Business, facts and figures 1998-2002, Eurostat
- *Key technologies for Europe*, Commission européenne, septembre 2005 (www.cordis.lu/foresight/key_tech.htm)
- *European Foresight Monitoring Network* - www.emfn.info
- *Fiches de présentation synthétique des Pôles de compétitivité labellisés* - CIADT du 12 juillet 2005
- *Technologies du futur - Enjeux de société*, Ecrin, 2005
- *Pour une nouvelle politique industrielle*, Jean-Louis Beffa, 2005
- *Pour un écosystème de la croissance*, Christian Blanc, rapport au Premier ministre, 2004
- *Opération Futuris*, ANRT (www.anrt.asso.fr), 2003-2005
- *Converging Technologies - Shaping the future of European Societies*, Commission européenne, 2004
- *Principaux enjeux et verrous scientifique au début du XXI^e siècle*, *Synthèses des rapports sur la science et la technologie*, Académie des sciences, Avril 2004

TIC

- *Digiworld 2005*, publication Idate, 2005
- *Livre Bleu : grands programmes structurants*, Propositions des industries électroniques et numériques, juillet 2004
- *Économie du logiciel : renforcer la dynamique française*, Rapport du groupe de travail présidé par Hugues Rougier - Commissariat général du plan, octobre 2002
- *Le logiciel libre : mythes & réalité*, Perspectives technologiques & Opportunités stratégiques, PAC Vision, 2005
- *ITEA Technology Roadmap for Software-Intensive System*, édition 2, Rapport du réseau européen ITEA, 2004
- *Productivité : les États-Unis distancent l'Europe*, Certe Gilbert, *Futuribles* n° 299, 2004
- *MEDEA+ Applications Technology Roadmap*, Vision on Enabling Technologies of the future MEDEA+ Programme, 2003
- *2003 Technology Survey (IEEE)*, APPLEWHITE Ashton, IEEE Spectrum, janvier 2003

Semi-produits

- *The vision for 2025 and beyond, A European technology platform for sustainable chemistry*, Cefic/EuropaBio, 2005, www.suschem.org
- *SusChem - Draft Strategic Research Agenda Reaction & Process Design*, Cefic/EuropaBio, 15/06/2005
- *SusChem - Developing a Strategic Research Agenda for Industrial Biotechnology*, EuropaBio/ESAB, 13/06/2005, working doc.
- *Avenir de l'industrie chimique en France à l'horizon 2015*, Groupe de réflexion stratégique (Pdt : Député D. Garrigue), mai 2005

- *Smart materials for the 21st century*, Smart Materials Taskforce of the Foresight Materials Panel (Royaume-Uni), 2004, www.iom3.org/foresight
- *Functional materials, future directions*, Functional Materials Taskforce of the Foresight Materials Panel (Royaume-Uni), 2004, www.iom3.org/foresight
- *Les enjeux des nouveaux matériaux métalliques*, Christian Hocquard, Géosciences, n°1, janvier 2005, p. 6 - 11
- *Products and processes for a sustainable chemical industry : a review of achievements and prospects*, Jean F. Jenck et al., Green Chem., 2004, n°6, p. 544 - 556

Construction, génie civil, habitat

- *Challenging and changing Europe's built environment: a vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030*, European Construction Technology Platform, février 2005
- *Strategic Research Agenda for the European construction sector*, European Construction Technology Platform, juin 2005

Énergie, environnement

- *Nouvelles technologies de l'énergie*, rapport préparé sous la direction de Thierry Chambolle, 2004
- *Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle*, communication à l'Académie des technologies, 2005
- *Key tasks for future European energy R&D*, Commission européenne, 2005
- *113 technologies dans le domaine de l'environnement*, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 2004
- *European vision for water supply and sanitation in 2030*, Water Supply and Sanitation Technology Platform, juin 2005
- *Promouvoir les technologies au service du développement durable: plan d'action de l'Union européenne en faveur des écotechnologies*, communication de la Commission européenne, janvier 2004

Besoins quotidiens

- *PharmaFrance 2004 : S'inspirer des politiques publiques étrangères d'attractivité pour l'industrie pharmaceutique innovante*, Antoine Masson, Conseil général des mines, mai 2004
- *Rapport sur l'attractivité de la France pour les industries des biens de santé*, Jean Marmot, 12/05/2004
- *Synthèses OCDE : Textile & Vêtements*, novembre 2004
- *La place des biotechnologies en France et en Europe*, Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifique et technologique, Jean-Yves Le Déaut, 27/01/2005
- *Rapport sur les enjeux des essais et de l'utilisation des organismes génétiquement modifiés*, Rapport de la mission d'information sur les enjeux des essais et de l'utilisation des organismes génétiquement modifiés, Jean-Yves Le Déaut, 13/04/2005

- *Biomédicaments en France, État des lieux 2004*, Étude du Comité biotechnologique du Leem, Karim Ibazatene, juin 2005
- *Biotechnologies : Emploi, métiers et formation*, Étude du Leem, septembre 2005

Transports

- *Strategic Research Agenda*, Ertrac (*European Road Transport Research Advisory Council*), 2004
- *Proposition pour fédérer les stratégies de déploiement des ITS en France*, ITS France, juin 2005
- *Strategic Rail Research Agenda 2020*, ERRAC (*European Rail Research Advisory Council*), 2002
- *Strategic Research Agenda 2020*, ACARE (*Advisory Council for Aeronautics Research in Europe*), 2002
- *Agora 2020*, Centre de veille et de prospective du ministère de l'Équipement, www.equipement.gouv.fr/recherche/pvs/CPVS6/activites_recherche_agora2020.htm

Équipements, process et méthodes de production

- *International technology roadmap for semiconductors: 2004 update*, Sematech ITRS, 2004
- *A method for analysing collective design processes*, Françoise Darses et al, rapport de recherche Inria 4258, septembre 2001
- *Livre blanc sur l'optique : bilan des forces et faiblesses de l'optique en France*, 2004
- *La biophotonique française, perspectives de développement*, OpticsValley, juin 2003
- *Rapport sur l'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies*, sénateur Claude Saunier, rapport de l'OPECST n°244
- *Vision 2020. Nanoelectronics at the center of change*, Commission européenne, rapport du High level group on nanoelectronics

Annexe 3 – Priorités technologiques d’autres pays

Les exercices de prospective d’autres pays ont été présentés sous l’angle de la méthode dans l’introduction du présent rapport. Les principaux axes prioritaires de recherche, ou technologies clés, retenus à l’issue de ces études sont présentés ci-dessous.

Allemagne

L’exercice allemand, à l’initiative du ministère fédéral de l’Éducation et de la Recherche, est fondé sur quatre *guiding visions* :

- comprendre les processus de la pensée : sur la base de l’étude de l’extrême complexité du cerveau humain, un ensemble de technologies sont développées. À titre d’exemple, on cite : algorithmes et raisonnements informatiques, principe du codage des neurones, architecture informatique, robotique autonome, capteur ;
- la santé par la prévention : il s’agit d’assurer une excellente qualité de vie à l’ensemble des individus et groupes sociaux, et de réduire les inégalités sociales face aux soins. Les priorités de recherche sont les suivantes :
 - collecte et évaluation systématique des données, nouveau type de diagnostic ;
 - système de prévention précoce ;
 - authentification de données relatives aux patients ;
 - protection et stockage des données ;
 - développement et fabrication de capteurs ;
 - développement de diagnostics génétiques ;
 - techniques d’implémentation de solutions techniques ;
 - acceptabilité et éthique ;
- vivre dans un monde en réseau individuel et sûr : les principaux axes de recherche sont les suivants :
 - interfaces homme-machine, dispositifs mobiles ;
 - systèmes embarqués ;
 - logiciels ;
 - réseau et structure de fourniture de services ;
 - sécurité : protection de la communication, authentification ;
- accès libre à l’enseignement : il s’agit ici de concevoir un monde capable de proposer un accès libre à l’enseignement et à la connaissance. Le volet technologique de cet objectif est moindre comparativement au volet de gestion et d’organisation (réseaux de sites d’éducation,...). Le e-learning est cependant directement concerné par cet axe de recherche.

Royaume-Uni

Le Royaume-Uni, dans son troisième cycle de prospective technologique (*round 3*), cible plusieurs projets de recherche. Quelques projets ayant « livré » leurs résultats sont présentés ci-dessous, ainsi que les axes prioritaires de chacun.

- prévention de la cyber-criminalité :
 - technologies pour la surveillance et la vie privée ;
 - technologies pour les services web interopérables ;
 - plate-forme de travail sûre (notion d’inviolabilité, d’infaillibilité) ;
 - infrastructures (sûreté sur l’ensemble du réseau) ;

- exploitation du spectre électromagnétique :
 - technologies optiques de transfert de données ;
 - procédés de fabrication par laser ;
 - technologies champ proche ;
 - imagerie non-intrusive ;
- sciences liées au cerveau (en relation avec les problématiques de traitements médicamenteux et de toxicomanie) :
 - génétique et génomique ;
 - économie ;
 - psychologie expérimentale ;
- sciences sociales : sociologie, psychologie, histoire sociale, épidémiologie, anthropologie,...) ;
- éthique ;
- psychologie clinique.

Espagne

L'Espagne a fixé ses axes de recherche prioritaires sur les domaines suivants :

- agroalimentaire ;
- énergie ;
- environnement ;
- chimie ;
- technologie de l'information et des communications ;
- transport ;
- transformation et fabrication ;
- industrie traditionnelle : textile, chaussure, jouets, bois et meubles, verre et céramique, bijouterie).

États-Unis

Lors de l'exercice *New force at work*, les technologies « critiques » (*critical technologies*) retenues par les États-Unis sont les suivantes :

- technologies transversales :
 - logiciel ;
 - microélectronique et télécommunications ;
 - technologies avancées pour l'optimisation des process de fabrication ;
 - matériaux ;
 - capteurs et technologies de l'image ;
- technologies d'interface :
 - technologies de séparation (tri et filtration,...) ;
 - technologies de révision et de réparation (ex : maintenance et réparation de logiciel) ;
 - systèmes de coordination pour la production de produits complexes.

Canada

Le Canada a focalisé ses travaux vers deux thèmes précis : la « géostratégie » et la « biosystème ».

Le thème « géostratégie » propose la convergence des axes de recherche suivants :

- biomédecine, robotique, intelligence artificielle, nanotechnologies (Brain) ;
- réseau électronique terrestre: micro et nanocapteurs, technologie de l'information, communication sans fil, systèmes géospatiaux ;
- prévision météorologique et gestion des risques, capteurs en réseau, observation temps réel, infrastructure numérique de la surface terrestre ;
- transfert de technologies militaires vers des applications civiles.

Le thème « biosystémique » rassemble les axes de recherche suivants :

- écologie et son impact sur les sciences des matériaux ;
- épidémiologie ;
- biotechnologies, bioinformatique ;
- technologies de l'information, technologies cognitives ;
- génie génétique ;
- semi-conducteurs, photonique ;
- génomique ;
- nanotechnologies.

Japon

Les résultats de la dernière étude Delphi du Japon (projection à trente ans) ont mis en avant les technologies suivantes (selon les six principaux thèmes initiaux, regroupant 100 technologies) :

- 3 thèmes sont considérés comme prioritaires :
 - science de la vie, santé et agriculture ;
 - informatique, électronique ;
 - terre et mer, espace, ressource et environnement ;
- 3 thèmes sont classés en seconde position :
 - matériaux ;
 - fabrication, distribution, business ;
 - urbanisation, transport et services.

331

Chine

Les priorités de la Chine, identifiées lors de son dernier exercice de prospective, sont les suivantes :

- technologies de l'information et des communications :
 - logiciel ;
 - ordinateurs ;
 - sécurité de l'information et des réseaux ;
 - circuits intégrés ;
 - techniques audio et vidéo ;
- sciences de la vie et ingénierie :
 - technologie pour l'agriculture biologique ;
 - biomédecine ;
 - sciences de la vie ;
 - biologie environnementale et industrielle ;
- nouveaux matériaux :
 - matériaux de structure ;
 - matériaux fonctionnels ;
 - matériaux pour l'informatique et l'électronique ;
 - nanomatériaux.

Annexe 4 - Les technologies « candidates »

Le « vivier » des technologies candidates pour être clés était composé de 251 technologies :

- 119 technologies clés 2005 ;
- 132 technologies proposées au cours de l'étude, soit directement sur le site Internet www.tc-2010.fr, soit par les experts au cours des réunions thématiques, soit par l'équipe projet.

Ces 251 technologies ont fait l'objet d'un examen systématique par les experts, sur la base des critères définis au début de l'étude.

Le tableau ci-dessous récapitule le statut de l'ensemble des technologies envisagées comme « candidates » pour être clés. Les colonnes « statut » et « N° TC 2010 » du tableau s'interprètent comme suit :

- il y a trois statuts possibles pour une technologie candidate :
 - TC 2010 : la technologie candidate a été retenue comme technologie clé ;
 - I : la technologie candidate n'a pas été jugée clé comme telle, mais elle a été intégrée dans une technologie clé 2010 de portée plus vaste (système, famille) ;
 - NR : la technologie candidate n'a pas été retenue comme clé ;
- la colonne « N° TC 2010 » rappelle la référence de la (ou des) technologie(s) clé(s) 2010 dans laquelle se retrouve la technologie candidate. Nota : il se peut que certaines technologies classées « NR » se retrouvent toutefois traitées, marginalement, dans une technologie clé : dans ce cas, la colonne « N° TC 2010 » comporte le numéro de référence de la technologie clé concernée.

N°	Technologie clé 2005	Statut	N° TC 2010
1	Microélectronique silicium		77
2	Microtechnologies - Microsystèmes		77,80
3	Microélectronique III V (AsGa, InP,...)		19
4	Capteurs intelligents	TC 2010	75
5	Mémoires de masse	I	2
6	Composants optoélectroniques et photonique	I	78
7	Composants d'interconnexion et d'interface	I	9
8	Capteurs de vision ou capteurs d'image	I	11,55,74,75
9	Écrans plats	NR	17
10	Équipements et matériaux pour salles blanches, robotique	NR	
11	Batteries et gestion de la microénergie	TC 2010	1
12	Objets communicants autonomes (identifiants intelligents, étiquettes)	TC 2010	4,9
13	Assistants digitaux portables	NR	
14	Technologies logicielles pour les systèmes temps réel ou contraint	I	6,7
15	Technologies logicielles de la langue et de la parole	I	13
16	Infrastructures pour réseaux dorsaux haut débit	I	9
17	Technologies de boucle locale	I	8
18	Technologies logicielles pour le transport de données	I	9
19	Réseau domestique numérique	I	8
20	Technologies logicielles pour la sécurité des réseaux	I	10

21	Intermédiation et intégration de services pour l'Internet du futur	I	13
22	Grands serveurs	I	12,15
23	Transmission temps réel de contenus multimédias	I	12
24	Technologies logicielles pour la gestion des données et du contenu	I	11,12,13
25	Systèmes auteurs pour la création de contenu multimédia	I	12,13
26	Technologies logicielles de réalité virtuelle	I	16
27	Technologies logicielles de l'informatique distribuée	I	7,9,13
28	Génie logiciel	I	7
29	Ingénierie des grands systèmes complexes	I	82
30	Mesure et test de systèmes	I	6
31	Alliages de polymères	NR	
32	Nanocomposites et renforts nanométriques	I	18
33	Matériaux pour systèmes avancés (piézoélectriques, ferroélectriques et magnétiques)	I	19
34	Matériaux absorbants de chocs, de vibrations, de bruit, de chaleur	I	24
35	Matériaux pour procédés en milieux extrêmes (hautes températures, froid,...)	I	24
36	Fibres textiles fonctionnelles	I	25
37	Catalyseurs	I	20
38	Ingénierie et traitement des surfaces	TC 2010	79
39	Procédés biotechnologiques et biomimétiques de synthèse de minéraux et polymères	I	21
40	Procédés de mise en œuvre et de formulation de la matière molle	NR	
41	Élaboration de composites à matrice organique	NR	
42	Surveillance intelligente de l'élaboration et de la mise en œuvre des matériaux	NR	74
43	Évaluation non destructive de l'endommagement des matériaux et des assemblages	NR	24
44	Fabrication en petites séries à partir de modèles numériques	I	81
45	Modélisation complète de la transformation des matériaux et intégration dans des bases de données	NR	15
46	Modélisation moléculaire des polymères	I	15,49
47	Techniques de synthèse et des tests haut débit	TC 2010	49
48	Systèmes performants pour enveloppe de bâtiment	TC 2010	26
49	Techniques de diagnostic des structures	NR	
50	Technologie de déconstruction	NR	
51	Conception et mise en œuvre des ouvrages dans une logique de développement durable	I	28,29,30
52	Ingénierie concourante	I	81
53	Réalité virtuelle augmentée pour la conception architecturale et technique	I	15,16
54	Gestion de l'air dans les bâtiments	TC 2010	28
55	Réduction des bruits	NR	64
56	Béton à performances optimisées	I	24
57	Matériaux composites pour les routes (les enrobés)	I	56
58	Technologies de travaux souterrains	I	57

59	Off shore grands fonds	NR	
60	Robotique mobile en milieu hostile	I	56, 69
61	Stockage de l'énergie	I	1, 31, 32, 67
62	Pile à combustible	NR	1
63	Microturbine	I	1
64	Éolien offshore	I	32
65	Photovoltaïque	I	31
66	Éclairage et visualisation à basse consommation	TC 2010	36
67	Supraconducteur	NR	
68	Piégeage et stockage du CO ₂	I	37
69	Conditionnement - entreposage et stockage des déchets nucléaires à vie radioactive longue	NR	34
70	Fluides frigorigènes à haute qualité environnementale	NR	
71	Stabilisation en vue du stockage et de l'utilisation écocompatibles des déchets ménagers et industriels	NR	56
72	Recyclage de matériaux spécifiques	TC 2010	23
73	Élimination des métaux lourds dans les boues et les effluents	NR	
74	Filtration membranaire	I	40
75	Développement des techniques de diagnostic et de traitement des sols	NR	
76	Outils de gestion et d'évaluation des risques environnementaux et sanitaires	NR	
77	Ingénierie des protéines	I	46
78	Transgénèse	TC 2010	44
79	Détection et analyse des risques pour l'environnement lié aux OGM	I	44
80	Thérapie génique	TC 2010	47
81	Clonage des animaux	NR	
82	Criblage de molécules	I	49
83	Grefe d'organe	NR	
84	Thérapie cellulaire	TC 2010	45
85	Organes bioartificiels	NR	
86	Imagerie médicale	I	55
87	Chirurgie assistée par ordinateur	I	16,55
88	Miniaturisation des instruments de recherche médicale	I	55
89	Traçabilité	TC 2010	73
90	Marquage métabolique des aliments	I	72
91	Technologies « douces » pour la préservation de la qualité des aliments	I	53
92	Biocapteurs, biopuces	I	49
93	Architecture électrique	TC 2010	65
94	Architecture électronique - informatique répartie et multiplexage dans les véhicules	TC 2010	66
95	Compatibilité électromagnétique	NR	
96	Composants électroniques de moyenne puissance	I	65
97	Sûreté des systèmes (embarqués et des infrastructures)	I	6, 82
98	Ergonomie de l'interface homme-machine	I	14
99	Amélioration des performances énergétiques d'ensemble des véhicules	I	67, 60

100 Véhicules intelligents et communicants	NR	59
101 Moteurs thermiques	TC 2010	62, 63
102 Amélioration du coût et des performances des lanceurs spatiaux	NR	
103 Outils de personnalisation de la relation client	I	11
104 Agents intelligents	I	7,13
105 Offre de produits et de services de grande consommation à base de réalité virtuelle	I	16
106 Outils de santé à la disposition des consommateurs	NR	
107 Design sensoriel y compris la métrologie sensorielle	NR	
108 Méthodes de marketing liées à l'utilisation des TIC	NR	
109 Systèmes d'organisation et gestion industrielle améliorés	NR	81
110 Formalisation et gestion des règles métier	NR	
111 Outils d'aide à la créativité	NR	
112 Représentation de la perception du consommateur	NR	
113 Simulation, modélisation du comportement humain (dans le poste de travail, face au produit...)	I	15
114 Multireprésentation des objets virtuels - qualité de la représentation	I	16
115 Simulation numérique des procédés	I	15
116 Représentation et gestion des processus de l'usine numérique	I	15
117 Prototypage rapide	NR	
118 Supply Chain Management	NR	
119 Soutien logistique intégré	NR	

Les technologies candidates proposées au cours de l'étude

N° Technologie clé 2005	Statut	N° TC 2010
120 Matériaux composites nanostructurés	TC 2010	18
121 Assemblage structural par collage	I	76
122 Procédés innovants (usinage grande vitesse, usinage jet d'eau, revêtements, outils de coupe)	I	80
123 Panneaux solaires photovoltaïques	I	31
124 Turbo Codes (applications télécoms)	I	9
125 Pilotage de processus collaboratifs (cf. systèmes complexes)	I	81,82
126 Opérations réseaux-centrées (applications militaires)	I	8
127 Logiciels répartis, logiciels scientifiques (communication entre ordinateurs, b to b, grilles de calculs)	I	9,15
128 Alimentation végétarienne	NR	
129 Les réseaux bayésiens (intelligence artificielle, aide à la décision)	I	13
130 Programmation par contraintes (optimisation combinatoire)	I	15,71
131 Programmation orientée aspect (AOP) (concevoir ces logiciels « par fonctions »)	I	7
132 Web sémantique pour l'éducation	I	13

133 Mise en œuvre - Assainissement - Pressurisation de circuits en ambiance cryogénique	NR	
134 MDA (Model Driven Architecture, une technologie de génie logiciel)	I	7
135 Méthodologie de conception et d'innovation (volet SHS en complément des SPI)	I	81
136 Domotique	NR	
137 Processeurs asynchrones (modifications architecturales fines)	NR	3
138 Communication (plate-forme de veille pédagogique pour le e-learning)	I	13
139 Modélisation de la cellule vivante - chaînage d'action des services web, applications et librairies	I	7,15
140 LED de puissance pour éclairages public et technique	I	36
141 Logiciels de traduction automatique	I	13
142 Règles explicatives (intelligence artificielle)	I	13
143 Mousses métalliques et/ou structures alvéolaires	I	24,60
144 TAPP : Transactional Access Point Protocol		5
145 Batteries lithium-ion	I	31, 32, 67,71
146 RSS (syndication et aggrégation de contenus multimédias)	I	12
147 Technologies de génomique fonctionnelle à grande échelle appliquées à l'étude des maladies	TC 2010	48
148 Le code à bulles : solution de lutte contre la contrefaçon des produits et la falsification des documents.	I	72
149 Coconception	TC 2010	81
150 Barrage flottant antipollution	NR	
151 Technologie domotique et de services pour l'habitat	NR	
152 Les réseaux « Mesh » de maillage et de routage dynamique de réseaux sans fil	I	8
153 Bio-santé	NR	
154 Intégration électronique de puissance	I	65, 67
155 Génération électrique par thermoélectricité	NR	
156 RFID identification par la radiofréquence	I	4
157 ORBIman : réseaux métropolitains à QoS (hauts débits, sécurité...) contractualisables	I	9
158 Systèmes cellulaires pour la sélection de gènes et d'agents anticancéreux (criblage)	I	49
159 Matériaux souples pour stockage d'eau	NR	
160 Connexion sans fil très haut débit	I	8
161 Conversion directe optique-radio	I	78
162 Rafraîchissement d'images haute définition	I	12
163 Circuits souples intégrés	I	3,17
164 Capteurs répartis	I	75
165 Multisensorialité	I	14
166 Énergie portable	I	1
167 Projection miniaturisée	I	17
168 Papier, stylos et supports électroniques	NR	
169 Observations satellitaires radar en zone urbaine et périurbaine (interférométrie)	NR	
170 RFID en environnement métallique	I	4

171 Recyclage multimétaux par biotraitement des produits TIC en fin de vie	I	23
172 Accélération de la dégradation des déchets fermentescibles et valorisation énergétique	TC 2010	42
173 Réfrigération magnétique pour les marchés industriels et grand public	NR	
174 Moteur à air comprimé pour véhicules de tout type (camions, voitures de tourisme)	NR	
175 Gestion et préservation des ressources en eau souterraine	I	39,40
176 Petits véhicules aériens automatiques et autonomes	I	69
177 Inexpensive Broadband Access and interconnection	I	8
178 White Leds [light-emitting diodes]	I	36
179 Alternate Gate Dielectrics	I	19
180 Low-Cost Artificial Intelligence	I	13
181 Molecular Imaging	I	55
182 Open-Source Operating Systems	NR	
183 The Integration of biology and engineering	I	49
184 Applications de Galileo	TC 2010	70
185 Outil d'aide à la décision pour une meilleure politique de gestion des déchets municipaux	NR	
186 Traçage isotopique des sources de pollution atmosphérique (particules et gaz)	NR	
187 Measurement of innovation in the service industry	I	83
188 Les textiles intelligents	I	25
189 Géothermie haute enthalpie pour production d'électricité	NR	
190 Détection de résidus de substances médicamenteuses et pharmaceutiques	I	39
191 Techniques de spéciation des métaux	NR	
192 Outils de modélisation pour l'intelligence collective (systèmes complexes)	I	82
193 Catalyse homogène combinatoire	I	20
194 Géothermie EGS - production d'électricité à partir des roches chaudes et fracturées - concept EGS (<i>Enhanced Geothermal Systems</i>)	NR	
195 Géothermie décentralisée - production d'électricité et de chaleur à partir de réservoirs moyenne température	NR	
196 TIC - applications Internet mutualisées - gestion d'infrastructures	NR	
197 Sondes géothermales pour pompes à chaleur	I	35
198 Géostructures énergétiques	I	35
199 Stylo numérique	NR	
200 Architectures orientées services	I	5
201 Technologies de lutte contre la contrefaçon	I	72
202 Operating System Open Source vs. Microsoft	NR	
203 Loi de Moore sub-45 nanomètres 2010 - Sources optiques puissantes à 13 nanomètres (100 electron-volts) et optiques en rayons X pour la lithographie extrême UV	I	77,78
204 Objet sensible	NR	
205 « Intelligence minérale » pour une gestion durable des ressources minérales	NR	
206 Utilisation rationnelle des énergies	I	

207 Reprendre le contrôle de l'ordinateur portable par le biais du téléphone portable	NR	
208 Conception assistée par ordinateur	I	15
209 Personnalisation (customisation) pour l'habillement	NR	
210 Développement des textiles destinés à des usages techniques	TC 2010	25
211 Développement durable pour le textile	I	25
212 Nanotechnologies appliquées au textile	I	25
213 Biotechnologies pour le textile	I	25
214 Moyens préventifs de lutte contre tous types d'inondations	NR	
215 Signature électromagnétique des composants du vivant	NR	
216 Toiture solaire à moyenne concentration	I	30
217 Moteur électrique et alternateur à aimant permanent et électronique associée	I	67
218 Production d'un substitut du gasoil à partir de la biomasse lignocellulosique	I	33
219 Générateur électrique à piston libre et combustion à très haute température	I	62
220 Éoliennes off shore flottantes multi-rotors	NR	
221 Production d'électricité avec des capteurs à moyenne concentration	NR	
222 Liquéfaction de la biomasse lignocellulosique par hydrothermolyse flash	I	33
223 Aide à la créativité	NR	
224 Lean management	NR	
225 E-PLI	NR	
226 Systèmes pour la production d'électricité en période de pointe ou de crise	NR	
227 Automatisation des systèmes ferroviaires	NR	
228 Antennes	I	75
229 Sécurité de fonctionnement	I	6,82
230 Liaisons sans fil sécurisées	I	10
231 Informatique contextuelle	I	8,11
232 Manipulation de contenus multimédias	I	12
233 Outils de veille et d'intelligence économique et gestion des connaissances	I	13
234 Intégration d'applications d'entreprise	I	5,7
235 Logiciels pour l'éducation et la formation	I	13
236 Terminal multistandard (numérique, analogique)	I	9
237 Visualisation d'informations et de données complexes (y compris réalité virtuelle)	I	14, 16, 17
238 Reconnaissance de caractéristiques biologiques	I	72
239 Cryptographie pour l'authentification	I	10
240 Méthodes et processus de soutien à l'innovation	I	83
241 Architecture des ressources humaines de l'entreprise	NR	
242 Authentification par des élément générés par un processus de chaos	I	72
243 Technologies logicielles pour la sécurité des réseaux	I	10
244 Technologies d'identification de produits, sans contact (RFID)	I	4

245 Détection et analyse NRBC (nucléaire, radiologique, biologique, chimique)	NR	
246 Ordinateurs quantiques	NR	
247 Ingénierie financière de l'innovation et du développement	I	83
248 Veille pédagogique	I	13
249 Outils de formation aux sciences et aux techniques	NR	
250 Systèmes autoapprenants pour l'aide à la décision	I	13
251 Logiciels de traduction automatique et mémoire de traduction	I	13

Annexe 5 – Liste des disciplines scientifiques

Biochimie
Biologie moléculaire
Biologie cellulaire
Biologie des organismes
Sciences médicales et alimentation
Physico-chimie de la pharmacologie
Neurosciences
Médecine et odontologie
Biologie des populations et écologie
Chimie physique
Chimie analytique
Chimie moléculaire
Chimie du solide
Matériaux
Physique théorique
Optique
Physique des constituants élémentaires
Physique des milieux dilués
Physique des milieux denses
Sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère)
Astronomie, astrophysique
Énergétique
Mécanique des fluides
Génie des procédés
Mécanique
Génie des matériaux
Génie civil
Informatique
Automatique
Traitement du signal
Électronique
Photonique
Optronique
Mathématiques et leurs applications
Sciences du langage
Psychologie
Sociologie
Démographie
Droit et sciences politiques
Économie et gestion
Géographie et aménagement

Annexe 6 – Liste des compétences technologiques et codes CIB

Électronique - électricité

Composants électriques	F21 ; G05F ; H01B, C, F, G, H, J, K, M, R, T ; H02 ; H05B, C, F, K
Audiovisuel	G09F, G ; G11B ; H03F, G, J ; H04N, R, S
Télécommunications	G08C ; H01P, Q ; H03B, C, D, H, K, L, M ; H04B, H, J, K, L, M, Q
Informatique	G06 ; G11C ; G10L
Semi-conducteurs	H01L ; B81

Instrumentation

Optique	G02 ; G03B, C, D, F, G, H ; H01S
Analyse - mesure - contrôle	G01B, C, D, F, G, H, J, K, L, M, N, P, R, S, V, W ; G04 ; G05B, D ; G07 ; G08B, G ; G09B, C, D ; G12
Ingénierie médicale	A61B, C, D, F, G, H, J, L, M, N
Techniques nucléaires	G01T ; G21 ; H05G, H
Chimie - matériaux	
Chimie organique	C07D, F, G, H, J
Chimie macromoléculaire	C08B, F, G, H, K, L ; C09D, J
Chimie de base	A01N ; C05 ; C07B ; C08C ; C09B, C, F, G, H, K ; C10B, C, F, G, H, J, K, L, M ; C11B, C, D
Traitements de surface	B05C, D ; B32 ; C23 ; C25 ; C30
Matériaux - métallurgie	C01 ; C03C ; C04 ; C21 ; C22 ; B22 ; B82

Pharmacie - biotechnologies

Biotechnologies	C07K ; C12M, N, P, Q, S
Pharmacie - cosmétiques	A61K, P
Produits agricoles et alimentaires	A01H ; A21D ; A23B, C, D, F, G, J, K, L C12C, F, G, H, J ; C13D, F, J, K

Procédés industriels

Procédés techniques	B01 ; B02C ; B03 ; B04 ; B05B ; B06 ; B07 ; B08 ; F25J ; F26
Manutention - imprimerie	B25J ; B41 ; B65B, C, D, F, G, H ; B66, B67
Appareils agricoles et alimentation	A01B, C, D, F, G, J, K, L, M ; A21B, C ; A22 ; A23N, P ; B02B ; C12L ; C13C, G, H
Travail des matériaux	A41H ; A43D ; A46D ; B28, B29 ; B31 ; C03B ; C08J ; C14 ; D01 ; D02 ; D03, D04B, C, G, H ; D06B, C, G, H, J, L, M, P, Q ; D21
Environnement - pollution	A62D ; B09 ; C02 ; F01N ; F23G, J

Machines - mécanique - transports

Machines-outils	B21 ; B23 ; B24 ; B26D, F ; B27 ; B30
Moteurs - pompes - turbines	F01 (sauf F01N) ; F02 ; F03 ; F04 ; F23R

Procédés thermiques	F22 ; F23B, C, D, H, K, L, M, N, Q ; F24 ; F25B, C ; F27 ; F28
Composants mécaniques	F15 ; F16 ; F17 ; G05G
Transports	B60 ; B61 ; B62 ; B63B, C, H, J ; B64B, C, D, F
Spatial - armement	B63G ; B64G ; C06 ; F41 ; F42

Consommation des ménages - BTP

Consommation des ménages	A24 ; A41B, C, D, F, G ; A42 ; A43B, C ; A44 ; A45 ; A46B ; A47 ; A62B, C ; A63 ; B25B, C, D, F, G, H ; B26B ; B42 ; B43 ; B44 ; B68 ; D04D ; D06F, N ; D07 ; F25D ; G10B, C, D, F, G, H, K
BTP	E01 ; E02 ; E03 ; E04 ; E05 ; E06 ; E21

Annexe 7 – Liste des domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche
Industries agricoles et alimentaires
Habillement, cuir
Édition, imprimerie, reproduction
Industrie pharmaceutique
Fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien
Industries des équipements du foyer
Industrie automobile
Construction navale
Construction de matériel ferroviaire roulant
Construction aéronautique et spatiale
Autres véhicules
Industries des équipements mécaniques
Fabrication de machines de bureau et de matériel informatique
Industries des équipements électriques et électroniques
Industries extractives
Fabrication de verre et d'articles en verre
Fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction
Industrie textile
Travail du bois et fabrication d'articles en bois
Industrie du papier et du carton
Chimie, caoutchouc, plastiques
Métallurgie et transformation des métaux
Fabrication de matériel électrique
Fabrication de composants électroniques
Production de combustibles et de carburants
Production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur
Captage, traitement et distribution d'eau
Bâtiment
Travaux publics
Commerce et réparation automobiles
Commerce de gros, intermédiaires
Commerce de détail, réparations
Services de transports
Activités financières
Activités immobilières
Postes et télécommunications
Services informatiques
Services aux entreprises
Assainissement, voirie et gestion des déchets
Recherche et développement
Hôtels et restaurants
Activités récréatives, culturelles et sportives
Services personnels et domestiques
Éducation
Santé, action sociale
Administration

Annexe 8 – Liste des pôles de compétitivité

Biothérapies (Pays de la Loire)
Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Aquatique (Nord-Pas-de-Calais)
Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France)
Industries et agroressources (Champagne-Ardenne et Picardie)
Céramique (Limousin, Centre et Midi-Pyrénées)
Filière équine (Basse-Normandie)
Nucléaire de Bourgogne (Bourgogne)
Plasturgie (Rhône-Alpes et Franche-Comté)
Cosmetic Valley (Centre, Île-de-France, Haute-Normandie)
Sea-Nergie (Bretagne)
Innovations thérapeutiques (Alsace)
Images et réseaux (Bretagne)
Agronutrition en milieu tropical (Dom-Tom)
Techtera (Rhône-Alpes)
EMC2 (Pays de la Loire)
Industries du commerce (Nord-Pas-de-Calais)
Mer, sécurité et sûreté (Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Viameca (Auvergne et Rhône-Alpes)
Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Enrrdis (Rhône-Alpes)
Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre)
Fruits et légumes (Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes)
Vestapolis (Île-de-France) + Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie) = Mov'éo
Fibres naturelles Grand Est (Alsace et Lorraine)
Gestion des risques et vulnérabilités des territoires (Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon)
Lyonbiopôle (Rhône-Alpes)
Cancer-Bio-Santé (Midi-Pyrénées, Limousin)
Innovation dans les céréales (Auvergne)
Viandes et produits carnés (Interrégional)
Génie civil ouest (Pays de la Loire)
Up - Tex (Nord-Pas-de-Calais)
Trimatec (Languedoc-Roussillon)
Sports & Loisirs (Rhône-Alpes)
Elopsys (Limousin et Midi-Pyrénées)
Pin maritime (Aquitaine)
Vitagora (Bourgogne)
Parfums, arômes, senteurs (Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes)
Route des lasers (Aquitaine)
I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie)
Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie)
System@tic (Île-de-France)
Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté)

Ville et Mobilité (Île-de-France)
Enfant (Pays de la Loire)
Vallée de l'Arve (Rhône-Alpes)
Minalogic (Rhône-Alpes)
Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées)
Logistique Seine Normandie (Haute-Normandie)
Mipi (Lorraine)
Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes)
Énergies renouvelables-bâtiment (Languedoc-Roussillon)
Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes)
Microtechniques (Franche-Comté)
Q@limed Agropolis (Languedoc-Roussillon)
Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes)
Loisirs numériques (Rhône-Alpes)
Méditech Santé (Île-de-France)
Matériaux domestique (Nord-Pas-de-Calais)
Végétal spécialisé (Pays de la Loire)
Énergies non génératrices de gaz à effet de serre (Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Prod'innov (Aquitaine)
L'aliment de demain (Bretagne)
Nutrition santé longévité (Nord-Pas-de-Calais)
Orpheme (Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon)
Polymers Technologie (Basse-Normandie, Haute-Normandie, Centre et Pays de la Loire)
Ecoindustrie (Poitou-Charente)