

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

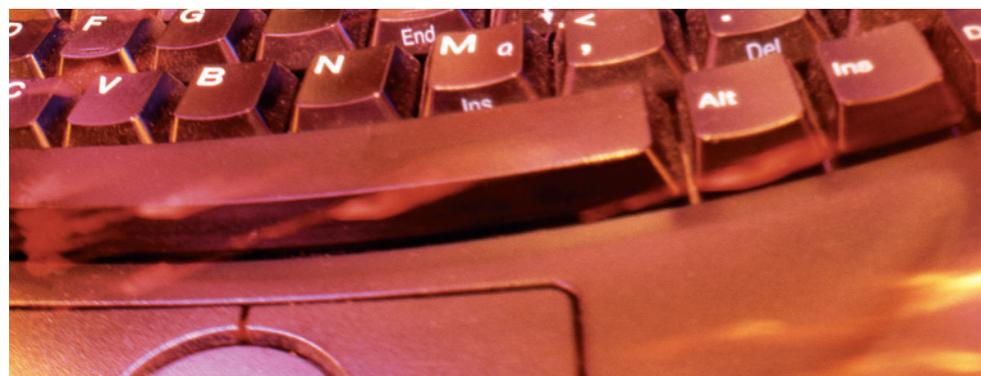
56	Architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre.....	232
57	Travaux d'infrastructuresfurtifs.....	234
58	Infrastructures routières intelligentes.....	236
59	Sécurité active des véhicules.....	238
60	Architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules.....	240
61	Sécurité 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

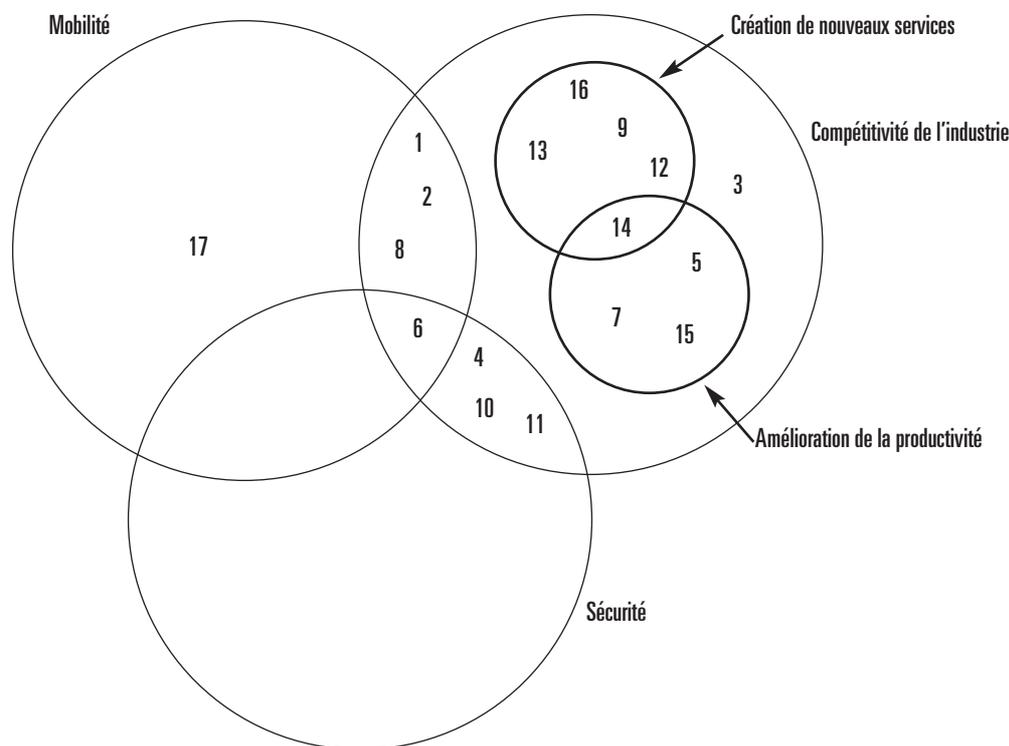
74	Contrôle de procédés par analyse d'image.....	288
75	Capteurs intelligents et traitement du signal.....	290
76	Assemblage multimatériaux.....	293
77	Micro et nanocomposants.....	295
78	Procédés et systèmes de photonique.....	298
79	Nouveaux procédés de traitement de surface.....	300
80	Procédés de 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 : télévisión, 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 capitalistique 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).

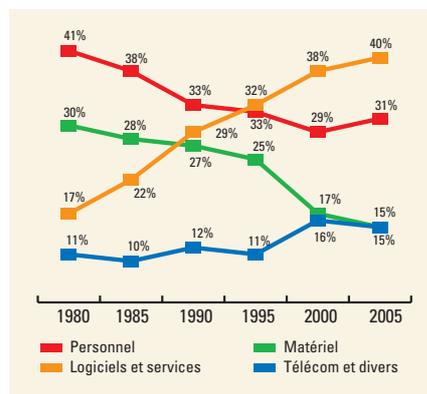
Les services de télécommunication à eux seuls représentaient 38 % du marché mondial des TIC en 2004. Le segment mobile, en progression depuis 2002, a contribué à plus de 80 % de sa croissance. Avec un montant pouvant atteindre près de 1 063 Md\$ en 2008, les communications interpersonnelles représentent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

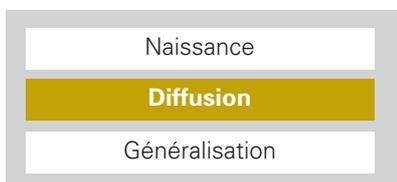
■ Compétences technologiques : composants électriques, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, chimie de base, traitements de surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail des matériaux, procédés thermiques, composants mécaniques, transports, spatial - armement.

■ 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



Domaines d'application



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.

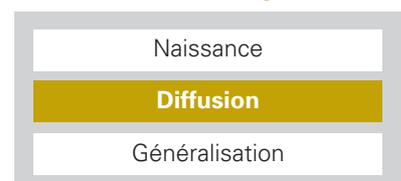
■ Pôles de compétitivité : Minalogic (Rhône-Alpes) (www.minalogic.com), Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur). En marge, le pôle Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France) propose d'adresser les problématiques d'archivage audiovisuel.

■ 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



Domaines d'application



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.medea.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 puissant, 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

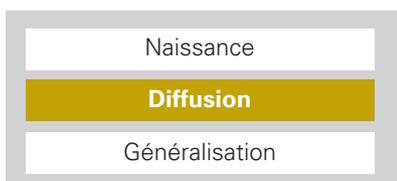
Le marché est colossal puisqu'il s'agit d'équiper les objets « intelligents » de demain, et concerne de vastes secteurs d'application comme :

- 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.

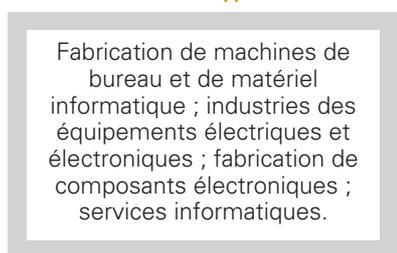
Parmi les différents types de processeurs, on peut citer les exemples suivants :

- 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), Irisa (Rennes), Irit (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 levés :

- 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 : Gieseke&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 offreuses (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 logiciels 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



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-Pirrttem, 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, Caggemini, 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 hard-soft ;
- 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 :

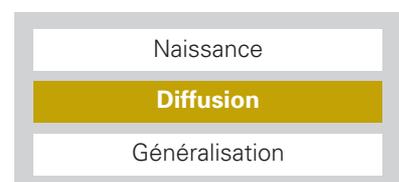
- le transport automobile et aéronautique : assistance à la conduite et à la commande de vol, maintenance des véhicules, contrôle aérien ;
- le spatial : véhicule orbital ;
- la défense : contrôle de trajectoires, lanceur ;
- le secteur de la santé : équipement de diagnostic médical et de soins ;
- le 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



Domaines d'application



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

nelles 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.

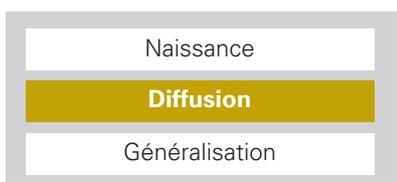
Acteurs

■ 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

Activités financières ; activités immobilières ; services informatiques ; services aux entreprises ; activités récréatives, culturelles et sportives ; éducation ; santé, action sociale ; administration.

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



Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

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

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-mobile.

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.

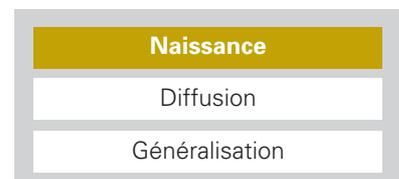
■ Principaux acteurs français

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



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



Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

10. Sécurisation des transactions électroniques et des contenus

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, antispam) ;
- 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.

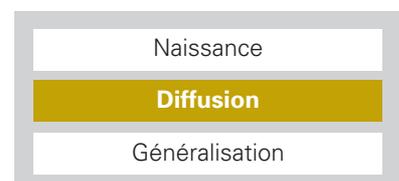
Il faut noter que le cadre législatif de la signature électronique, de la protection des données personnelles ou de la gestion des droits numériques, ainsi que les normes relatives aux processus d'authentification ou aux algorithmes de cryptographie, ont un impact important sur ce domaine. Élaboré, pour 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



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 cli-chés) ; 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 équipement 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



Domaines d'application



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 bayesiens, 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

sentation 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.

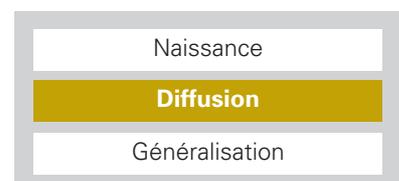
Acteurs

■ 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, Languedoc-Roussillon), Elopsys (Limousin, Midi-Pyrénées).

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



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), Alstavista (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).

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

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

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).

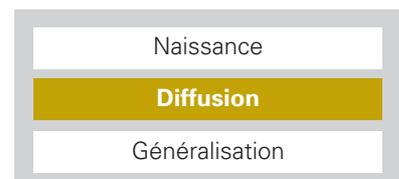
La nécessité de tester certaines technologies sur l'humain (pour les implants neuro-naux, par exemple) est un facteur qui doit être pris en compte dans le développement de ces technologies. Les aspects technologiques relatifs à la notion d'interopérabilité sont fortement contraints par les normalisations 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



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

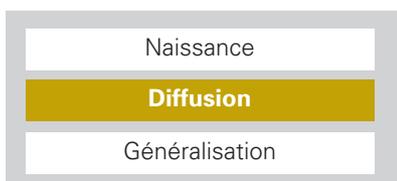
■ Disciplines scientifiques : à travers les applications potentielles de cette technologie, l'ensemble des disciplines scientifiques est concerné.

■ 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



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.reseaux-chu.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.

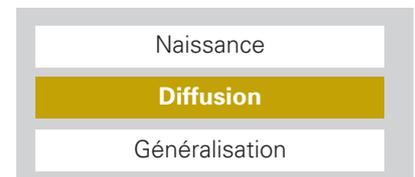
■ Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Loisirs numériques (Rhône-Alpes), System@tic (Île de France), Elopsys (Limousin, Midi-Pyrénées).

■ 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.

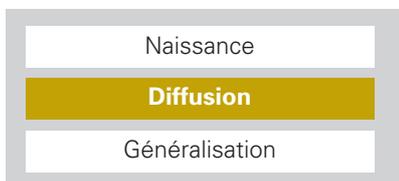
- Exemples d'acteurs dans le monde : Texas Instruments (États-Unis), Samsung (Corée du Sud), Philips (Pays-Bas), Sony (Japon), Hitachi (Japon), Sharp (Japon), Optrex (Japon), Kyocera (Japon), E-Ink (États-Unis), Kodak (États-Unis), MicroOptical (États-Unis).

- 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



Domaines d'application

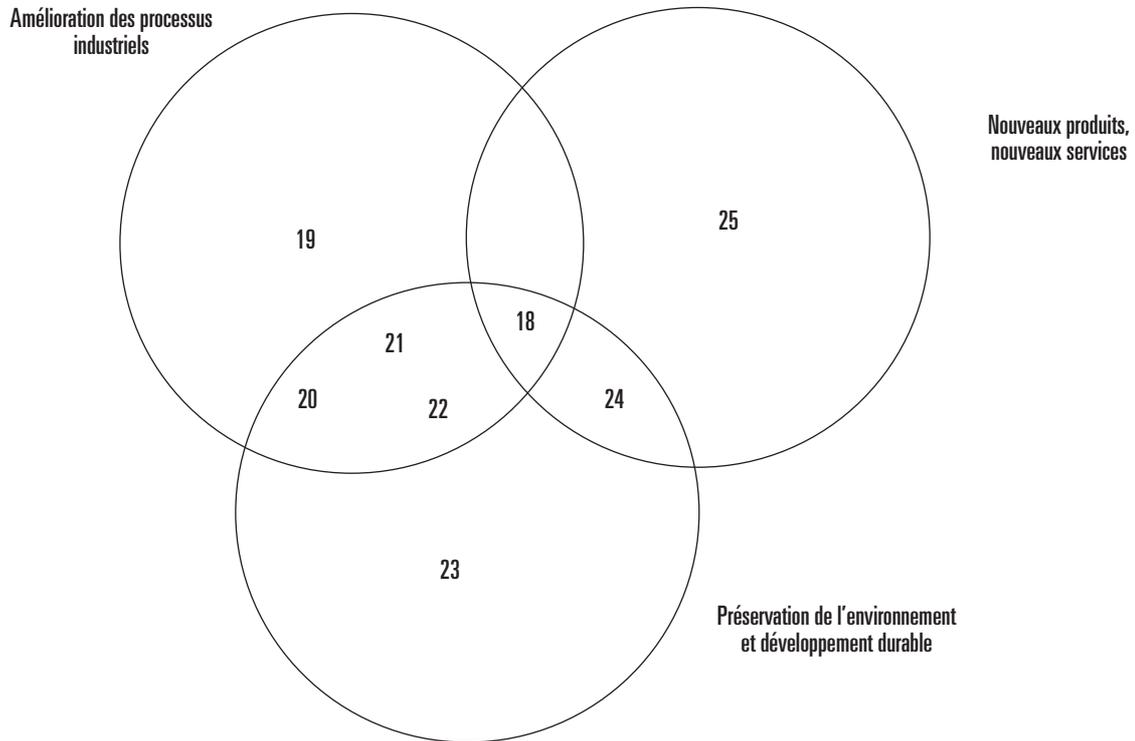




Matériaux - chimie

- 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-

voux 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

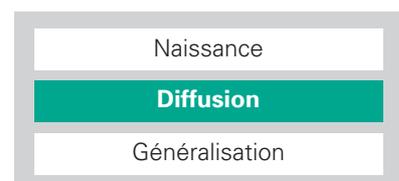
- Disciplines scientifiques : chimie physique, chimie analytique, chimie moléculaire, chimie du solide, matériaux, physique théorique, optique, physique des constituants élémentaires, génie des matériaux, électronique, photonique, optronique.

- 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, Spintron, 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 Semicondutor (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, transgène, 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 processus 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.

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.

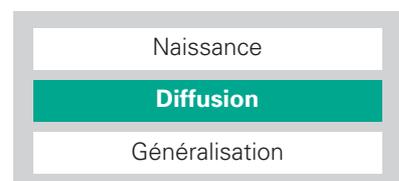
■ Principaux acteurs français

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



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

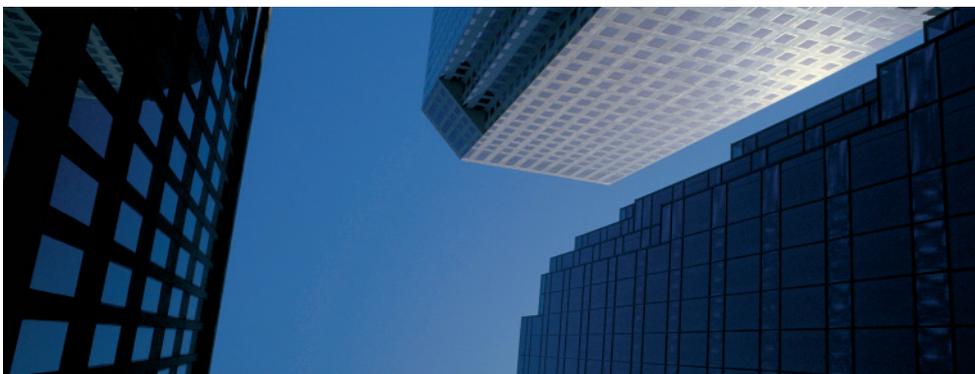
Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

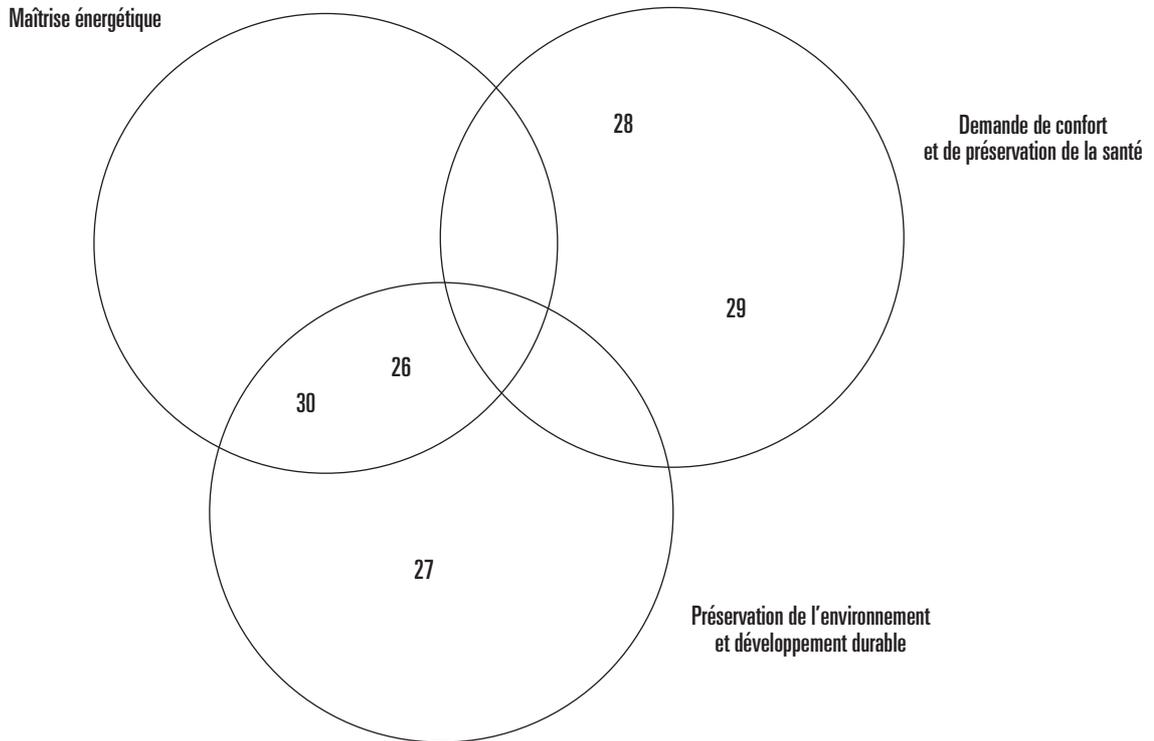
Habillement, cuir ; industrie pharmaceutique ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; industrie textile ; bâtiment ; agriculture ; recherche et développement.



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).

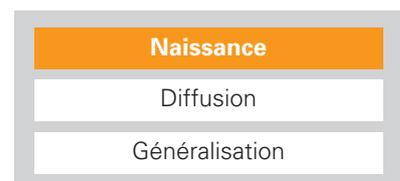
Industriels :

- 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



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



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

27. Matériaux composites pour la construction, à base de matériaux recyclés ou de biomasse

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.

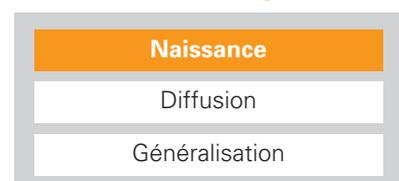
Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre du Réseau génie civil et urbain (RGCU) (www.rgcu.prd.fr).

■ 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



Domaines d'application



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), Cethyl (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).

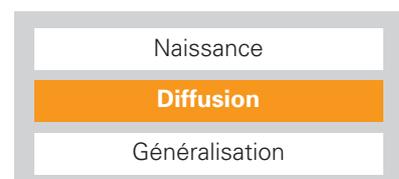
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Barcol Air (Suisse), Carrier (États-Unis), Daikin

(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 (ASTEES) (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



Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

30. Technologies d'intégration des ENR dans le bâtiment

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 oeuvre 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 oeuvre 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



Domaines d'application

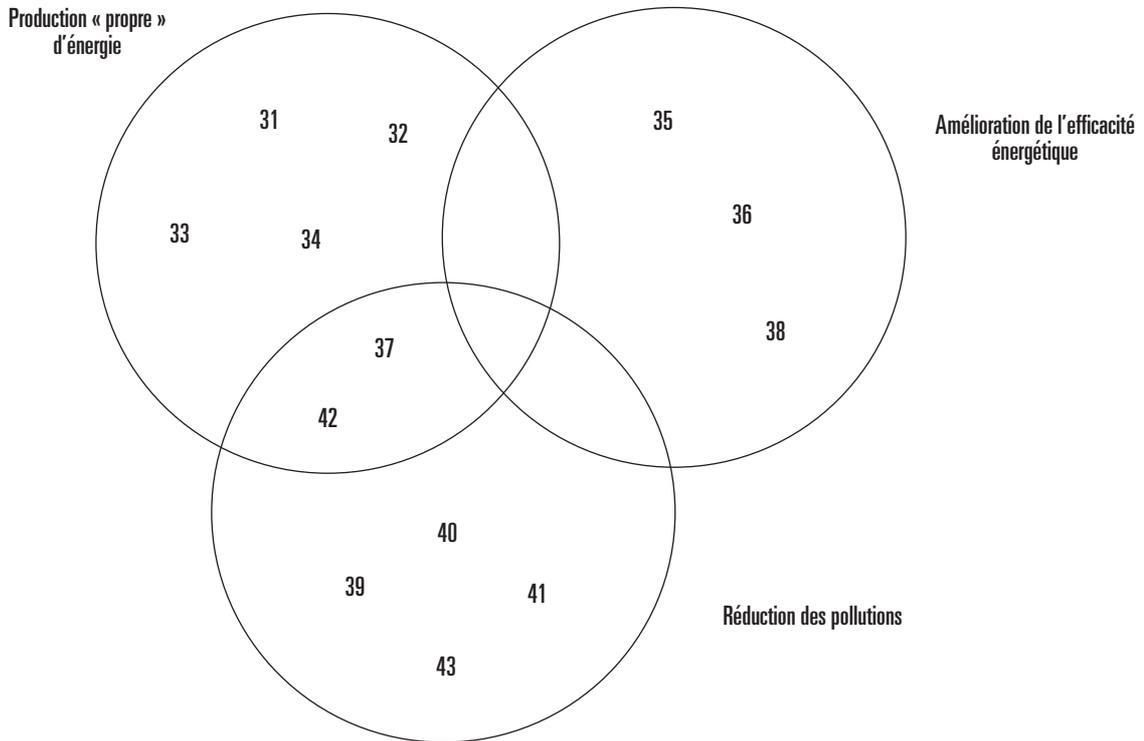




Énergie - environnement

- 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 Safège, de Buregeap... 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 écotecnologies 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, bénéfiques 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.

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).

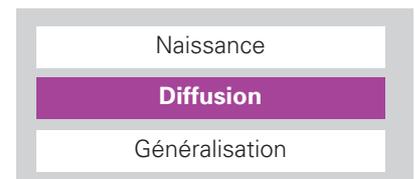
L'industrie photovoltaïque française repose essentiellement sur un ensemble de PME, en général adossées à des grands groupes, dont l'activité est en grande partie tournée vers l'exportation.

■ 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).

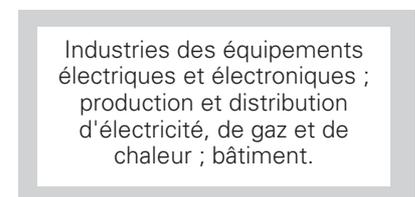
Commentaires

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



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

32. Systèmes éoliens avec stockage intégré

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).

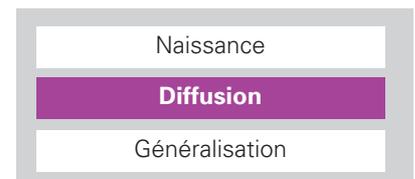
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Enercon (Allemagne), Gamesa (Espagne), GE Wind Energy (États-Unis), Nordex (Allemagne), Vestas (Danemark)... ; European Wind Energy Association (www.ewea.org).

Commentaires

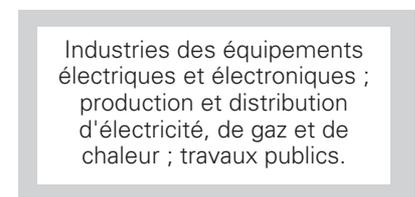
En France, un des freins au développement de la production d'électricité à partir d'éoliennes n'est pas d'ordre technique, mais relève plutôt de l'acceptabilité sociale : la présence d'une ferme éolienne est parfois considérée comme une nuisance (esthétique et sonore). Améliorer les conditions techniques 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



Domaines d'application



Énergie - Environnement



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

33. Carburants de synthèse issus de la biomasse

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 éthanologique 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

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).

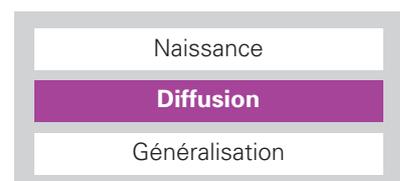
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Abengoa (Espagne), Cargill (États-Unis), Nestlé Oil (Finlande), Petrobras (Brésil)... ; European Biodiesel Board (www.ebb-eu.org) ; Réseau d'excellence européen Bioenergy (www.bioenergy-noe.org).

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



Domaines d'application



Énergie - Environnement



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

34. Réacteurs nucléaires de 3^e génération

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-

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).

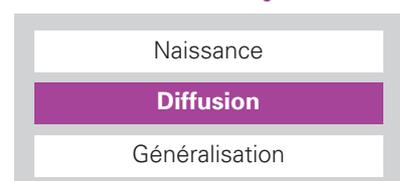
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Bechtel (États-Unis), Belgonucléaire (Belgique), BNFL (Royaume-Uni), General Electric (États-Unis), Mitsubishi (Japon), Urenco (Royaume-Uni)... ; Agence internationale de l'énergie atomique (www.iaea.org) ; World Nuclear Association (www.world-nuclear.org).

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



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 : Cetiati, 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).

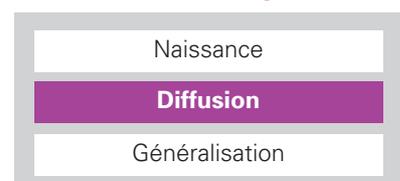
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Dai-

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



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

37. Capture et stockage géologique du CO₂ avec nouvelle conception de centrale à charbon

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.

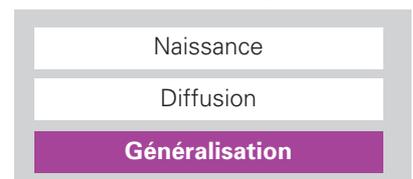
■ Exemples d'acteurs dans le monde : ABB (Suède-Suisse), General Electric (États-Unis), Hitachi (Japon) , Toshiba (Japon), Siemens (Allemagne)... ; Cigre (www.cigre.org)

: 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



Domaines d'application



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

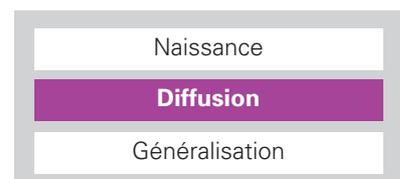
menés dans le cadre du réseau Riteau (www.riteau.org).

■ 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).

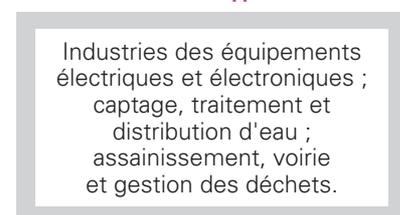
Commentaires

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



Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

40. Technologies de filtration membranaire (traitement de l'eau)

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 Technomembranes, LIPE (Insa Toulouse).

Industriels : Anjou Recherche, Aquasource, Degremont, Orelis, Polymem, Tami Indus-

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).

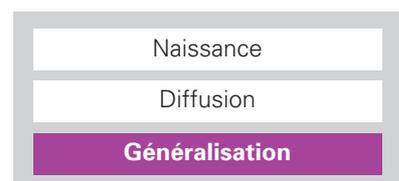
Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre du réseau Riteau (www.riteau.org).

■ 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)...

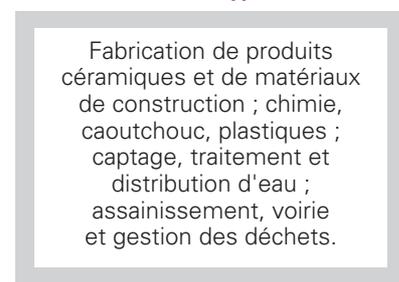
Commentaires

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



Domaines d'application



Énergie - Environnement



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

41. Automatisation du tri des déchets

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 aéroulque : trommel ou séparateur aéroulque (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,

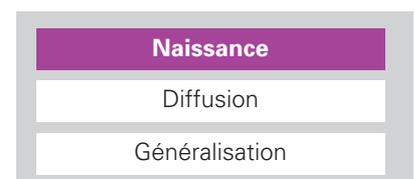
Pellenc Environnement, Raoul Lenoir, Vauche... ; opérateurs de centres de tri : Coved, Onyx, Sita, régies...

■ 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)...

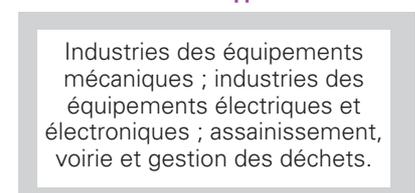
Commentaires

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



Domaines d'application



Énergie - Environnement



Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

42. Accélération de la dégradation des déchets fermentescibles et valorisation énergétique

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)

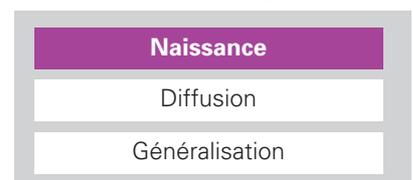
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Ows (Belgique), Linde (Allemagne), Schmack Biogas (Allemagne)...

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



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



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

43. Traitement des odeurs non confinées

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 capture 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 : Eco-lair (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.

