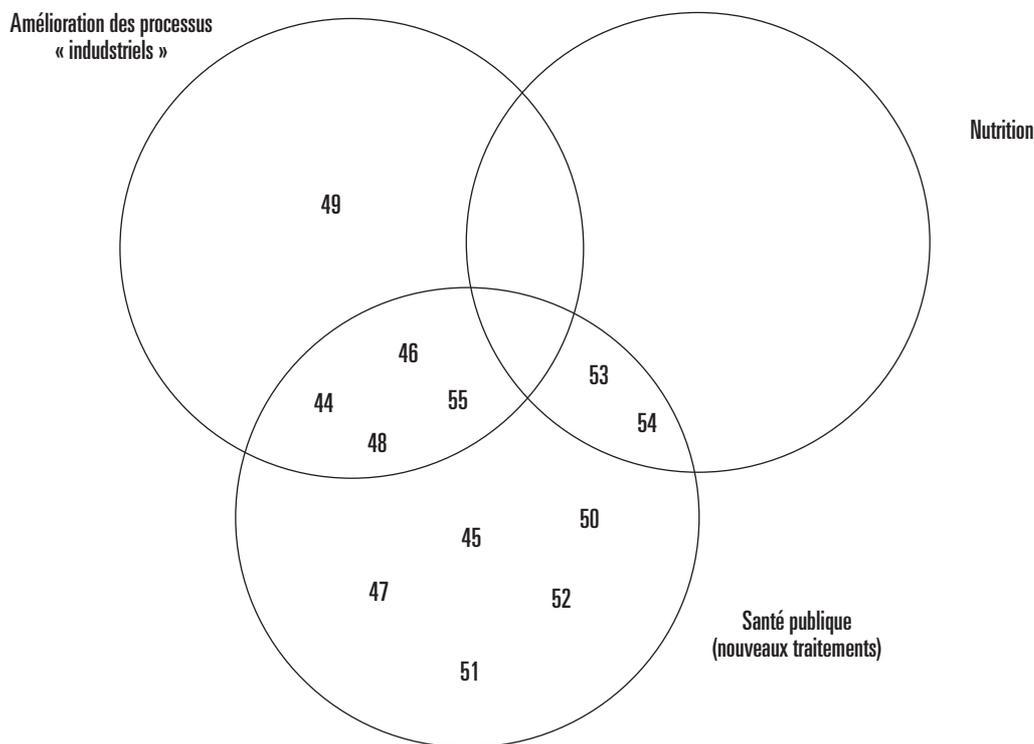




Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

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

Des grands enjeux aux technologies clés



190

Le secteur des technologies du vivant, de la santé et de l'agroalimentaire

Le contexte

Dans le cadre de l'étude, le secteur des

technologies du vivant, de la santé et de l'agroalimentaire a été considéré comme correspondant au domaine des besoins quotidiens. Ce dernier rassemble les activités industrielles et les services qui leur sont liés, et qui ont pour vocation de répondre aux obligations et aux besoins ordinaires de tout individu : se nourrir, se soigner, s'habiller...

Ce secteur, dont le chiffre d'affaires HT en France, en 2004, atteint 278 Md€, inclut l'agriculture, l'industrie agroali-

mentaire, la pharmacie, les produits de toilette (dont les parfums) et détergents et enfin le textile et l'habillement, le cuir et les chaussures. Plusieurs de ces domaines sont des contributeurs de tout premier plan dans la balance commerciale française : l'agriculture et l'industrie agroalimentaire, la pharmacie, les cosmétiques.

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Agriculture	60,9 ^(b)	900	662 000 ^(c)
Industrie agroalimentaire	125,5	386	3 182
Pharmacie	46,0	98,4	277
Produits de toilette (dont les parfums) et détergents	20,4	52,1	293
Textile et habillement, cuir et chaussures	25,4	161,1	2156
Total	278,2	1 597,6	

a : entreprises de 20 salariés et plus

b : production (prix de base)

c : exploitations agricoles : recensement agricole 2000

Source : Chiffres clés des industries - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005) et SCEES (2004)

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Industrie des viandes	30,6	127,6	1 019
Industrie du poisson	3,0	13,6	150
Industrie des fruits et légumes	6,5	22,0	164
Industrie des corps gras	1,7	2,0	28
Industrie laitière	24,3	57,3	321
Travail des grains	4,8	12,1	113
Fabrication d'aliments pour animaux	9,7	19,2	208
Autres industries alimentaires	25,8	93,3	754
Industrie des boissons	19,1	38,9	425
Total industrie agroalimentaire	125,5	386	3 182

(a) : entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés de l'industrie agroalimentaire Agreste - enquête annuelle d'entreprise sur les IAA - Résultats provisoires 2004

Agriculture

Au niveau européen, l'agriculture contribue pour 2,1 % à la valeur ajoutée totale, et occupe 6,3 millions de personnes. Les dix nouveaux pays membres intégrés à l'UE le 1^{er} mai 2004 contribuent pour 9 % à la production agricole de l'UE (la Pologne, la Hongrie et la République tchèque sont les plus importants contributeurs).

En France, le secteur emploie près de 900 000 UTA¹ dont 630 000 non salariés. La production agricole a atteint, en 2004, 60,9 Md€ (source : SCEES, Service central des enquêtes et études statistiques du ministère de l'agriculture et de la pêche), la valeur ajoutée brute engendrée s'élevant à 29 Md€. La valeur de la production a augmenté par rapport à 2003 grâce à l'abondance des récoltes qui a contrecarré la baisse importante des prix des produits végétaux. La France est le premier producteur européen de semences (source GNIS).

Entre 2000 et 2004, le résultat agricole net par actif, en termes réels, a diminué de 1,2 % en moyenne par an.

De manière plus générale et compte tenu du relatif ralentissement attendu de la croissance démographique au niveau mondial, on s'attend à ce que la croissance de la demande mondiale de produits agricoles, qui était en moyenne de 2,2 % ces 30 dernières années, chute à 1,5 % par an dans les 30 prochaines années. Dans les pays en développement, le ralentissement sera encore plus spectaculaire, de 3,7 % à 2 %.

Industrie agroalimentaire

En France, en 2004, le chiffre d'affaires du secteur atteint 125,5 Md€ (HT), (voir tableau ci-dessus).

En 2002 et 2003, la France était le leader européen dans le secteur en termes de chiffre d'affaires et représentait à elle seule environ 20 % du CA européen (UE 25 ; source : CIAA, Confédération des industries agroalimentaires de l'UE).

Avec un CA de 125,5 Md€ en 2004, répartis sur onze domaines d'activité, ce secteur se place parmi les tous premiers contributeurs à l'économie nationale. Il emploie 386 000 personnes dans les entreprises de plus de vingt salariés. Entre 2000 et 2004, le CA de l'industrie agroalimentaire a progressé d'environ 9,5 %. Avec un solde commercial positif d'environ 7,5 Md€ en 2004 (mais en

baisse de 7,4 % par rapport à 2003), l'industrie agroalimentaire est en 3^e position derrière l'automobile et les biens d'équipement comme contributeur à la balance commerciale française, et reste le 1^{er} exportateur mondial de produits transformés.

L'industrie agroalimentaire est un débouché majeur pour l'agriculture nationale dont elle transforme plus de 70 % des produits. La valeur ajoutée de la transformation dépasse celle de la production agricole depuis plus de vingt ans.

Les éléments décrits ci-dessus ne doivent pas faire oublier certaines faiblesses de l'industrie agroalimentaire. Le secteur de l'industrie agroalimentaire est assez peu structuré : sur 11 000 entreprises au total, seulement 3 200 ont plus de vingt salariés. De plus, il n'existe pas de grands leaders mondiaux : Danone, leader français, oscille entre le 10^e et le 15^e rang mondial. Enfin, ce secteur dépend de plus en plus de l'oligopsonne formé par le petit nombre d'entreprises de la grande distribution, aujourd'hui en capacité d'exercer une forte pression sur les marges des industriels alimentaires.

(1) Le nombre d'UTA (Unité de travail annuel) d'une exploitation est la mesure du travail fourni par la main-d'œuvre, en prenant comme standard le travail d'une personne à plein temps pendant une année entière. On inclut dans ce calcul l'activité des personnes de la famille, celle des salariés permanents ou occasionnels et celle des ETA (entreprise de travaux agricoles) et des CUMA (coopérative d'utilisation de matériel agricole).

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Fabrication de produits pharmaceutiques de base	3,7	9,6	30
Fabrication de médicaments	41,3	83,3	217
Fabrication d'autres produits pharmaceutiques	1,0	5,4	30
Total pharmacie	46,0	98,3	277

(a) : entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries de la pharmacie - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

Pharmacie

En France, en 2004, le chiffre d'affaires HT du secteur atteint 46,0 Md€ (voir tableau ci-dessus).

La valeur ajoutée de ce secteur était de 55,1 Md€ en 2001 dans l'UE25, et l'emploi de 550 000 personnes. La France, l'Allemagne et le Royaume-Uni sont les plus grands producteurs, avec des parts de marché de 19 % à 17 % chacun. La production a augmenté à un rythme de 5,6 % par an entre 1993 et 2003. Le Danemark, la Suède et la Belgique ont des industries pharmaceutiques hautement spécialisées.

En France, en 2004, avec 41,3 Md€, la fabrication de médicaments représente à elle seule 90 % du CA de l'industrie pharmaceutique. Le CA de ce secteur a augmenté de près de 35 % entre 2000 et 2004, et 4 500 emplois ont été créés pendant cette période. En 2004, 33,5 % du CA de l'industrie pharmaceutique a été dédié à l'exportation (65 % des exportations ont été réalisées vers l'UE), ce qui fait de ce secteur un des points forts du commerce extérieur français. Cependant, il convient de noter que l'augmentation des emplois et des exportations est principalement due à

l'installation en France de firmes internationales, ce qui peut être susceptible de fragiliser l'économie française en cas de délocalisations.

Parmi les autres produits pharmaceutiques, les dispositifs médicaux (produits de diagnostic, imagerie médicale, prothèses, pansements...) tiennent une place de choix avec un marché mondial de 76 Md€ (source : rapport Jean Marmot). En France, le vieillissement de la population et la demande accrue de soins offrent un potentiel de développement important. En 2003, le CA du secteur a été estimé à 5,2 Md€. Les États-Unis dominent le marché mondial : ils sont le principal pays investisseur dans ce secteur de l'industrie française, la plupart des entreprises de plus de 100 salariés étant des filiales de groupes américains.

La production française est concentrée sur quelques groupes. Le leader français, né de la fusion d'Aventis et de Sanofi-Synthelabo, réalise 28,5 % de la production nationale. L'industrie de la santé et des biotechnologies est relativement concentrée dans les quelques régions françaises qui disposent d'un potentiel scientifique et technique rela-

vement important. L'Île-de-France et, à moindre degré, Paca et Rhône-Alpes cumulent une base industrielle et un potentiel scientifique et technique importants. Le Languedoc-Roussillon, l'Alsace et Midi-Pyrénées disposent d'une activité industrielle importante dans le domaine de la santé, mais leur capacité scientifique et technique apparaît plus en retrait.

Produits de toilette (dont les parfums) et détergents

En France, en 2004, le chiffre d'affaires du secteur atteint 20,4 Md€ (voir tableau ci-dessus).

Avec 52 200 salariés, la France emploie à elle seule quasiment un quart des employés européens du secteur (225 000 au total).

Le secteur regroupe deux activités : la fabrication de savons, de détergents et de produits d'entretien d'une part (21 % du CA en 2004) et la fabrication de parfums et de produits pour la toilette d'autre part (79 % du CA en 2004). Ce deuxième domaine est de loin le plus développé. Il concentre à lui seul 13 % des parts de marché mondial du sec-

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Fabrication de savons, détergents et produits d'entretien	4,3	10,0	80
Fabrication de parfums et de produits pour la toilette	16,1	42,2	213
Total fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien	20,4	52,2	293

(a) entreprise de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries des produits de toilette (dont les parfums) et détergents - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises ^(a)
Industrie de l'habillement et des fourrures	10,3	57,5	827
Fabrication de produits textiles	4,9	32,5	438
Filature et tissage	5,1	30,1	442
Fabrication d'étoffes et d'articles en maille	1,4	11,3	153
<i>Total industrie textile et habillement</i>	<i>21,7</i>	<i>131,4</i>	<i>1 860</i>
Apprêt et tannage des cuirs	0,3	1,9	35
Fabrication d'articles de voyage et de maroquinerie	1,7	13,9	120
Fabrication de chaussures	1,7	13,9	141
<i>Total industrie du cuir et de la chaussure</i>	<i>3,7</i>	<i>29,7</i>	<i>296</i>
Total textiles et habillement, cuir et chaussure	25,3	161,1	2 156

(a) entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries du textile, de l'habillement, du cuir et des chaussures - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

teur. Le secteur est particulièrement dynamique (son CA a progressé de 22,6 % entre 2000 et 2004) et résolument tourné vers l'exportation : en 2003, son excédent commercial a atteint 5,9 Md€ (source : Sessi). Par ailleurs, la France possède sur son territoire plusieurs géants du luxe : Chanel, LVMH, YSL... et L'Oréal, leader mondial des cosmétiques.

Textile et habillement, cuir et chaussures

En France, en 2004, le chiffre d'affaires (HT) du secteur atteint 25,3 Md€ (voir tableau ci-dessus).

L'industrie textile et de l'habillement employait près de 2,6 millions de personnes dans l'UE 25 en 2003. Jusqu'en 2005, l'Europe a été le 1^{er} exportateur de textiles, et le 3^e de vêtements. La France est le 4^e contributeur en terme de valeur ajoutée, derrière l'Italie, le Royaume-Uni et l'Allemagne.

En France, le chiffre d'affaires de l'industrie du textile et de l'habillement atteint 21,7 Md€ en 2004 dont 47,5 % pour l'habillement et les fourrures, 22,6 % pour les produits textiles (linge de maison, ameublement, tapis et moquettes, non-tissés), 23,5 % pour la filature et le tissage (filature et tissage

du lin, du coton, de la laine, ennoblissement textile) et 6,5 % pour la fabrication d'étoffes et d'articles en maille. La répartition du chiffre d'affaires entre ces différents domaines était du même ordre en 2000 (respectivement 40,9 %, 20,8 %, 30,3 et 8,0 %). L'évolution la plus importante concerne le nombre de salariés : globalement, entre 2000 et 2004, la perte d'emplois est de 27,5 %. Le secteur des produits textiles est le moins touché, avec 13,9 %.

Ces pertes d'emplois s'expliquent par les profondes mutations que l'industrie textile - une des plus anciennes industries françaises - subit depuis 30 ans du fait de l'émergence de nouveaux concurrents issus de pays à faibles coûts salariaux. Depuis 1995, 40 % des entreprises françaises ont disparu suite à la délocalisation d'une partie des moyens de production vers l'Asie et l'Afrique du Nord. La fragilisation de l'industrie textile française et plus largement euro-méditerranéenne a été renforcée depuis le 1^{er} janvier 2005, date à laquelle l'importation des vêtements et produits textiles de Chine n'a plus été limitée (début juin, la Chine a signé un accord avec l'UE qui limite de 8 à 12,5 % par an jusqu'à fin 2007 la hausse de ses exportations d'une dizaine de produits

textiles). La balance commerciale du secteur, déjà déficitaire avant 2005, devrait s'effondrer. Les régions leaders en France sont le Nord-Pas-de-Calais et Rhône-Alpes.

L'industrie du cuir et de la chaussure réalise en 2003 un CA de 3,7 Md€. Elle est principalement composée de deux secteurs, la maroquinerie et la fabrication de chaussures, qui représentent l'un et l'autre quasiment la moitié du CA global et du nombre de salariés (13 900 chacun) ; le troisième secteur est l'apprêt et le tannage du cuir, qui représente 8 % du marché global.

La maroquinerie est un secteur artisanal, qui présente un savoir-faire traditionnel mondialement reconnu. Son chiffre d'affaires et le nombre d'emplois du secteur sont restés stables entre 2000 et 2004. La situation est différente pour le secteur de la fabrication des chaussures qui entre 2000 et 2004 a perdu 27,5 % de son CA et 40 % de ses emplois. La balance commerciale du secteur est déficitaire (de l'ordre de 1,8 Md€ en 2003), essentiellement à cause du secteur de fabrication de chaussures.

Les enjeux de ce secteur

Agriculture

Un enjeu très fort pour l'agriculture tourne autour des « bonnes pratiques » en termes d'occupation du territoire et de valorisation de celui-ci. Les ressources naturelles et l'environnement sont souvent « maltraités » par l'agriculture intensive au point que l'on s'inquiète de la qualité de l'eau ou de l'air, du maintien de la biodiversité, de l'entretien des paysages, des perturbations des climats, de l'aménagement de l'espace. La qualité et la sécurité alimentaires sont parfois prises en défaut consécutivement à des pratiques porteuses de dangers insoupçonnés et à l'inadéquation des contrôles. L'enjeu est d'aborder la problématique par une approche système, visant à développer une ingénierie de l'agriculture durable via la mise en place de techniques alternatives de culture, de nouvelles variétés, de plantes à plus faible besoin hydrique...

Le soutien public de l'agriculture reste coûteux et entraîne des distorsions de concurrence qui sont dénoncées dans les négociations internationales.

Enfin, le secteur agricole est un secteur de faible attractivité pour la main-d'œuvre. Il peut donc y avoir à terme des pénuries temporaires de main-d'œuvre.

Industrie agroalimentaire

Un des enjeux pour ce secteur est de prendre en compte le lien entre nutrition et santé et la demande de la part des consommateurs dans ce domaine. Au-delà de la satisfaction des stricts besoins nutritionnels, certains types d'alimentation pourraient jouer un rôle protecteur voire curatif vis-à-vis de certaines maladies, l'obésité par exemple. Plus généralement, répondre à l'évolution des cultures et des identités alimentaires est un enjeu fort pour l'industrie

agroalimentaire. Il y a une demande générale au niveau du goût, premier critère de choix des consommateurs et aussi au niveau de la qualité nutritionnelle. Dans ce domaine, la France est susceptible d'apporter une « dotation culturelle » riche.

La sécurité alimentaire et son contrôle sont également des enjeux majeurs pour ce secteur. Il s'agit, en synergie avec le secteur de l'agriculture et de la distribution, de répondre à une demande forte de la part des consommateurs mais aussi des autorités (règlements) d'assurer tout au long de la chaîne (production, transformation, distribution) un suivi permettant de répondre aux exigences de sécurité (notamment depuis les crises de l'ESB, de la listéria...). Dans ce domaine, les questions de logistique revêtent une importance particulière pour ces industries (traçabilité).

Enfin, les industries agroalimentaires sont un secteur où la culture du secret industriel conserve un statut important, puisque les formulations-recettes font partie d'un savoir-faire et sont difficilement protégeables. Les industriels de ce secteur sont donc peu enclins aux coopérations, tant entre eux qu'avec le secteur public. Il y a là un problème de gestion de savoir-faire non brevetable. Comment capitaliser ce savoir-faire et les « recettes » ?

Pharmacie

Trouver des solutions pour contrecarrer les effets du vieillissement de la population est un enjeu pour l'industrie pharmaceutique. Le développement des maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson...) et cardiovasculaires, et l'augmentation des dépenses de santé sont les principales conséquences de ce vieillissement. Les pouvoirs publics encouragent la consommation

de génériques dans le cadre de la régulation des dépenses de santé. Bien qu'ils ne représentent encore que 3,1 % du marché des médicaments remboursables, cette part de marché devrait progresser dans les années qui viennent car de nombreux brevets de *block busters* arrivent à expiration.

La compréhension des mécanismes d'émergence des virus représente un enjeu croissant, notamment dans un contexte de mondialisation de l'économie qui stimule la mobilité des personnes et par conséquent la propagation d'éventuelles épidémies.

Certains experts ont mis en évidence la difficulté à faire émerger, au niveau industriel, les compétences et connaissances académiques parfois très poussées des chercheurs français. On déplore de nombreux exemples de brevets abandonnés en France et repris en Amérique du Nord. À titre d'exemple, le dernier système d'imagerie mis au point par le Nobel français Georges Charpak est industrialisé par une entreprise canadienne. Le transfert de technologies est une étape clé et pourtant souvent difficilement réalisée, notamment dans le domaine de la biopharmacie.

Par ailleurs, un besoin essentiel en recherche pour les entreprises pharmaceutiques et de biotechnologies est de développer le maillage des expertises cliniques, pharmaceutiques et d'ingénierie afin de faire évoluer les démarches en R&D vers une approche plus globale : il s'agit notamment de réaliser, en parallèle, recherche fondamentale et clinique, d'anticiper le processus d'industrialisation et de production (Étude du LEEM, Les entreprises du médicament, septembre 2005).

Produits de toilette (dont les parfums) et détergents

La parfumerie, les cosmétiques, le luxe sont des secteurs d'excellence de l'économie française, créateurs d'emplois et de valeur ajoutée. Dans ce domaine, la France bénéficie d'un atout culturel lié à son image dans le domaine du luxe. Mais, outre l'enjeu de la création de nouvelles essences de base pour les parfums, un autre enjeu majeur pour les entreprises est la lutte contre la contrefaçon qui est particulièrement importante pour ce type de produits. Les technologies d'authentification et de traçabilité sont donc un défi pour ce secteur.

Par ailleurs, la cosmétique tend à se rapprocher de la pharmacie du point de vue des exigences de contrôle avant la mise sur le marché. Il y a aujourd'hui de plus en plus de listes de substances et de produits interdits ou toxiques. Dans ce contexte, l'innocuité des composants utilisés dans les produits cosmétiques est un enjeu clé pour l'acceptabilité des innovations.

Textile et habillement, cuir et chaussures

Suite à la délocalisation massive des moyens de production vers l'Afrique du Nord et l'Asie, le déplacement massif de la valeur ajoutée vers l'amont (la création, la recherche) et l'aval (la distribution, le marketing) semble impératif. Dans le secteur du textile, mettre en place des filières de produits à haute valeur ajoutée, comme les textiles techniques et fonctionnels, est un enjeu majeur pour l'avenir de ce secteur.

Dans le secteur de l'habillement, il demeure un enjeu important concernant des marchés de niche : réassortiment, haut de gamme, mode, tendance à la création de minicollections (modèle

Zara) au lieu du rythme semestriel printemps-été et automne-hiver. La lingerie, par exemple, est un des secteurs les plus dynamiques du textile français, et le seul à disposer d'entreprises de production d'assez grande taille (500, 600 personnes). Le consommateur mériterait d'être informé de la qualité des produits, de leur technicité (pictogrammes dédiés à la communication des fonctions cachées des textiles).

Les tendances d'évolution du secteur

Agriculture

Une tendance remarquable concerne la valorisation non alimentaire des cultures. Il s'agit d'utiliser la plante, partiellement ou dans son intégralité, à des fins industrielles. L'innovation repose sur l'utilisation de matières premières renouvelables et s'inscrit dans une logique de développement durable. Les domaines d'utilisation potentiels sont nombreux et variés :

- les besoins énergétiques, en particulier dans le domaine des biocarburants ;
- la pharmacie (production de protéines recombinantes à visée thérapeutique) ;
- la chimie (utilisation en chimie organique de nouveaux composés, issus de la synthèse de produits naturels et non naturels biologiquement actifs) ;
- les cosmétiques (utilisation de substances naturelles en formulation) ;
- la dépollution des sols (utilisation de plantes qui captent et métabolisent les polluants présents dans le sol) ;
- les matériaux (utilisation du bois notamment) ;

Il convient de noter que la France connaît une « artificialisation² » des terres relativement importante, qui est en général irréversible, les surfaces prises ne revenant que rarement à des usages

plus naturels. Dans ce contexte, la valorisation non alimentaire des cultures n'est pas sans soulever des questions concernant une éventuelle compétition des différents usages pour les terres agricoles et arables disponibles.

Par ailleurs, l'utilisation des biotechnologies pour mettre en place des techniques alternatives de culture, des nouvelles variétés, des plantes à plus faible besoin hydrique, ou encore pour réduire l'utilisation des pesticides ou engrais, semble stratégique et incontournable. Ces techniques viendront compléter les méthodes plus classiques (méthodes chimiques) qui devraient à court et moyen termes rester majoritaires. Il s'agit de pouvoir produire « propre » tout en gardant les rendements nécessaires pour répondre aux demandes.

La collaboration étroite entre les botanistes, écophysiolgistes, généticiens d'un côté, modélisateurs et mathématiciens de l'autre, doit permettre le développement des modèles mathématiques de croissance végétale. Ces modèles sont calibrés sur une grande gamme de plantes agronomiques et les applications en termes d'exploitation sont désormais envisagées. Il s'agit de modéliser la croissance végétale pour élaborer des outils performants d'aide à la décision (prédiction, optimisation, contrôle optimal : rationalisation de l'apport des ressources en engrais et en eau ou en traitements phytosanitaires, développement des cultures mixtes, contrôle de la qualité des produits...).

Enfin, la mécanisation et la robotisation des tâches pénibles pourraient permettre de faire face à la pénurie de main-

(2) L'urbanisation et la construction des infrastructures détruisent chaque année des milliers d'hectares, et généralement les villes se sont installées sur les terres les plus fertiles. C'est ce que l'on appelle « l'artificialisation » des terres. En France, les espaces bâtis ont augmenté leur superficie de 12 % depuis 1992, les routes et parkings de 10 %, et les sols artificiels non bâtis (jardins, terrasses ...) de 17 % (source : IFEN, Institut français de l'environnement, 2003).

d'œuvre et d'augmenter l'attractivité des métiers agricoles. Ceci est particulièrement vrai pour les métiers de l'élevage, pour lesquels les contraintes sont très importantes.

Industrie agroalimentaire

Sur le sujet nutrition et santé s'ouvre un vaste champ scientifique qu'il convient de mettre en perspective avec les déséquilibres croissants des régimes publics d'assurance maladie : l'« aliment santé » pourrait, dans une certaine mesure, prendre le relais du médicament sur le plan de la prévention.

L'agroalimentaire est un champ naturel d'application des biotechnologies. Mais cette application ne va pas sans difficulté. Certains experts soulignent, en effet, que les acteurs alimentaires privés s'appuient sur des marges significativement plus faibles que leurs homologues du médicament. Ils doutent de leur capacité à financer une R&D en biotechnologie suffisante. Par contre, l'utilisation de nouveaux outils de recherche ou de production, mis au point par ailleurs, est susceptible d'intéresser de très nombreuses entreprises de l'alimentation. Cette diffusion pourrait toutefois être limitée par l'acceptabilité de ces techniques par le consommateur, l'alimentation étant un domaine très sensible par rapport à l'introduction d'innovations porteuses d'une image de « manipulations génétiques ».

Enfin, parmi les technologies pouvant apporter des réponses aux enjeux cités précédemment, les TIC sont envisageables pour la gestion des connaissances et du savoir-faire (par exemple : technologies de « réalité augmentée » en appui à la pérennité du « tour de main »), la traçabilité (contrôle, sécurité), la logistique,

...

Pharmacie

Vue de manière très globale, on remarque que la pharmacie est en train de passer de l'influence de la chimie à celle de la biologie, même si la première reste utile. En 2003, plus de 40 % des nouvelles molécules mises sur le marché sont d'origine biologique. En France, entre 2000 et 2004, le chiffre d'affaires des biomédicaments a triplé (2,21 Md€ en 2004). Ce secteur présente un taux annuel de croissance de 30 %, supérieur au taux mondial sur la même période (18 %). Près de 80 % des biomédicaments commercialisés en 2004 sont indiqués pour traiter des pathologies à fort besoin non satisfait (près de 50 % sont utilisés pour traiter des cancers). L'utilisation de la transgénèse, et plus particulièrement des plantes pour produire des médicaments, est une tendance technologique de tout premier plan. Rappelons que dans ce domaine, le leader mondial, Meristem Pharmaceutique, qui a développé un produit contre la mucoviscidose, est français. La vectorisation, qui vise à améliorer l'efficacité des médicaments et/ou à faciliter leur administration, est aussi un axe de recherche stratégique. Il s'agit d'augmenter la biodisponibilité du principe actif, c'est-à-dire augmenter la quantité de principe actif réellement délivrée à la cible thérapeutique, le reste pouvant être transformé par des enzymes ou bloqué par des membranes. Un deuxième axe de recherche est la mise au point de modes d'administration plus faciles et plus confortables à utiliser pour le patient (on pense notamment à l'insuline inhalée pour le diabète).

Diverses avancées dans le domaine de la pharmacogénomique, de la biologie et de l'informatique appliquée à la santé (criblage à haut débit, biocapteurs, informatique embarquée dans le corps

humain, biosimulation...) pourraient dans les prochaines années modifier profondément les stratégies thérapeutiques et les industries de santé qui tendront à mieux se coordonner. L'orientation vers une médecine personnalisée pourrait être une des conséquences de cette évolution technologique.

Plus largement, la pluridisciplinarité (biologie, chimie, mathématiques, informatique, statistiques...) doit permettre d'apporter à l'industrie pharmaceutique des méthodes élaborées par la recherche publique pour la biologie à grande échelle et à haut débit, ou pour l'aide au diagnostic et à la décision de traitement. Le développement de modèles mathématiques de simulation devrait permettre de raccourcir la durée du développement d'un médicament actuellement trop long, trop risqué pour les industries pharmaceutiques, et trop coûteux pour la société. L'objectif est aussi d'obtenir des traitements plus ciblés dès la recherche initiale afin d'être le plus efficace possible et, bien sûr, le moins toxique. Il y a là, malgré les faiblesses de la France, une réelle opportunité à saisir pour inverser la tendance.

Produits de toilette (dont les parfums) et détergents

Efficacité et innocuité sont les deux facteurs clés qui orientent les axes de recherche dans ce domaine. Par ailleurs, les technologies utilisées en pharmacie sont parfois appliquées en cosmétique. La vectorisation, par exemple, est une des tendances technologiques développées pour augmenter l'efficacité des principes actifs. Il convient, enfin, de noter le fort intérêt porté aux substances naturelles en remplacement des conservateurs chimiques classiques.

Textile et habillement, cuir et chaussures

Les textiles techniques et fonctionnels constituent une réponse sectorielle face au défi de la mondialisation. Il s'agit d'un vaste ensemble de textiles élaborés pour répondre à un cahier des charges particulier. Les textiles techniques et fonctionnels remplissent un grand nombre de fonctions dans plusieurs domaines d'application (habillement, médical, transport, environnement, etc.) :

- fonctions mécaniques : contention, fixation, élasticité ;
- fonctions d'échange : filtration, isolation, perméabilité, absorption, respiration...
- fonctions de protection : thermique, comportement au feu, chimique, imperméabilité ;

- fonctions dans le domaine du vivant : biocompatibilité, biodégradabilité, fonctions antibactériennes, antiacariens...

La mise en place de nouveaux processus de fabrication pour relativiser la part de la main-d'œuvre dans le prix du produit est aussi une tendance technologique forte : il s'agit essentiellement de procédés de fabrication de produits non tissés tels que des matériaux souples produits à partir de fibres naturelles ou synthétiques, sans passer par les traditionnelles étapes de filature, de tissage ou de tricotage.

Dans le domaine de l'habillement, du linge de maison ou des textiles pour intérieur de voiture, la personnalisation (*mass customization*) peut être une réponse face à la production de masse (production de séries courtes, finissage

à la demande, utilisation de l'impression numérique...). D'autres technologies sont susceptibles d'apporter une rupture indispensable pour pénétrer des marchés de niche : la conception assistée par ordinateur dans la filière textile - confection-distribution, la visualisation 3D pour le consommateur de l'article conçu par ordinateur (costume homme, soutien-gorge Wacaol par exemple), l'apport de la sensation tactile de l'étoffe dans ces ventes immatérielles (dans ce domaine, les jeux sur ordinateur progressent dans l'apport des sensations haptiques, un transfert de technologies serait judicieux à promouvoir).

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



44. Transgénèse

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La fonction transgénèse correspond à la modification du génome d'un organisme par génie génétique. Elle permet une intégration stable de l'ADN étranger et peut être réalisée dans des micro-organismes, des cellules de plantes ou d'animaux. C'est un moyen de tirer partie de la variabilité génétique pour adapter les plantes et les animaux aux besoins socio-économiques.

Le succès de telles pratiques réside principalement dans leur acceptabilité par les consommateurs. Globalement, les applications agroalimentaires du génie génétique sont davantage contestées par le grand public que les applications médicales (même si le champ de maïs transgénique de Meristem, destiné à produire de la lipase gastrique utilisée contre la mucoviscidose, a été fauché).

Au niveau mondial comme à l'échelle française, peu de partenaires industriels sont impliqués. Il existe un réel fossé entre l'état d'avancement des travaux académiques et l'industrialisation qui pourrait en découler.

Enjeux, Impact

L'enjeu pour la France de la maîtrise de cette technologie est de :

- répondre au besoin en terme d'ingénierie de l'agriculture durable (diminution significative des traitements insecticides et herbicides, économie d'utilisation de l'eau pour l'irrigation, changement des pratiques culturelles vers une simplification du travail du sol) ;
- trouver des sources de protéines recombinantes comme les hormones pour traiter les maladies chroniques non transmissibles qui devraient représenter 73 % des décès dans les pays développés d'ici à 2020.

Au niveau réglementaire, la directive

2001/18/CE relative à la coexistence des cultures, à la transparence, à la mise sur le marché, à l'information du public, à la surveillance des risques, à l'étiquetage, est complétée par les réglementations CE 1829/2003 et 1830/2003.

L'impact sur la protection de l'environnement, sur la qualité sanitaire et nutritionnelle des aliments et sur l'apparition de nouveaux traitements médicaux issus de la transgénèse devrait se faire sentir d'ici 5 à 10 ans.

Marché

Les marchés de la transgénèse sont l'agriculture, la recherche et la santé :

- agriculture : plantes à plus faible besoin hydrique, plantes aux qualités nutritionnelles améliorées, simplification de l'agriculture, augmentation des rendements... ;
- recherche : production d'organismes transgéniques modèles de maladies pour tester des candidats médicaments ;
- santé : production de médicaments (protéines recombinantes : hormone de croissance, insuline ; vaccin contre l'hépatite B...), aliments santé (production d'aliments enrichis en éléments favorables pour la santé), xéno-greffe (transfert de cellules, d'un tissu ou d'un organe, entre deux individus qui appartiennent à des espèces différentes).

Soixante-dix millions d'hectares d'OGM sont cultivés dans le monde (5 % des terres cultivées). Le potentiel de diffusion de la technologie est dans ce domaine très important, notamment dans les pays en voie de développement (la Chine par exemple). Dans le domaine de la santé, 10 % du marché pharmaceutique mondial est aujourd'hui issu des biotechnologies. On estime que ce chiffre pourrait atteindre 25 % dans dix ans. Le marché des PMP (*Plant made pharmaceuticals*)

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

devrait atteindre 2,2 Md\$ aux États-Unis et 1,5 Md\$ en Europe, en 2011.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, neurosciences, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Innovation dans les céréales (Auvergne), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : génomique fonctionnelle à grande échelle ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit, ingénierie des anticorps monoclonaux ; vaccins recombinants ; alimentation pour le bien-être et la santé ; contrôle des allergies alimentaires ; carburants de synthèse issus de la biomasse ; biotechnologies industrielles.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cirad, Inra, Inserm, CNRS, Institut Pasteur (Pour en savoir plus: www.inra.fr/Internet/Directions/DIC/ACTUALITES/DOSSIERS/OGM/OGM.htm).

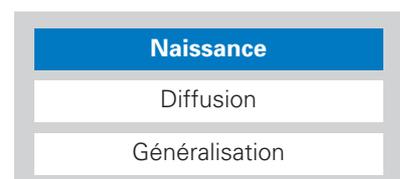
Industriels : Bioprotein, Genoway, Lemmagène, Meristem, Nucleis, Sanofi Pasteur, Vivalis.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Novartis Seed (Suisse), Monsanto (États-Unis).

Commentaires

Les efforts de la recherche publique doivent se poursuivre mais le tissu industriel et l'opinion publique français ne permettent pas un transfert de technologie satisfaisant. Peut-être serait-il souhaitable que les centres de recherche publique se tournent vers des industriels d'autres pays européens pour valoriser leurs savoir-faire ?

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



45. Thérapie cellulaire

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La thérapie cellulaire est une technique médicale permettant de traiter trois grands types de pathologies : les cancers, les maladies neurodégénératives (Parkinson, Alzheimer, Huntington...) et les pathologies entraînant la destruction de cellules, tissus ou organes (cœur : infarctus, foie : cirrhose...). Cette technique consiste en l'apport à un organisme de cellules pour prévenir, traiter ou atténuer une maladie. Les cellules peuvent venir du patient lui-même ou d'un donneur compatible. Aujourd'hui, plusieurs types de cellules sont utilisés :

- des cellules hématopoïétiques souches et primaires (cellules sanguines ; technologie mature) ;
- des cellules différenciées adultes (cellules spécialisées au niveau morphologique et/ou physiologique, par exemple cellule musculaire, de foie, de rein... ; technologie en croissance) ;
- des cellules souches adultes (les cellules souches sont des cellules non différenciées qui possèdent à la fois la capacité de se multiplier par divisions successives pendant une période indéfinie, et celle de donner naissance, dans des conditions déterminées, à une ou à plusieurs lignées d'éléments cellulaires différenciés ; technologie émergente) ;
- des cellules souches embryonnaires (technologie embryonnaire).

La maîtrise des cellules souches et de leur différenciation est essentielle au développement de cette technologie. Par ailleurs, à l'échelle industrielle, les procédés de fabrication mettent en œuvre des méthodes très innovantes, qui nécessitent la mise en place d'équipes multidisciplinaires.

Enjeux, Impact

Il est crucial de pouvoir trouver des traitements pour les maladies neurodégénératives, compte tenu du vieillissement de la population. En effet, en 2020, 26,8 % de la population française aura plus de 60 ans, et déjà, plus de 100 000 nouveaux cas de la maladie d'Alzheimer apparaissent chaque année. La maîtrise de la thérapie cellulaire pourrait permettre de faire face à cet enjeu. Les enjeux éthiques et réglementaires qui entourent cette technologie sont à prendre en compte :

- suite à la loi Bioéthique (n° 2004-800 du 6 août 2004), l'agence de la biomédecine a été créée en mai 2005. Cette agence délivrera les autorisations concernant les recherches sur l'embryon et les cellules embryonnaires. La recherche sur les embryons surnuméraires issus de la fécondation in vitro et ne faisant plus l'objet d'un projet parental est interdite. L'importation de cellules embryonnaires est en revanche autorisée ;
- le contexte réglementaire européen est flou pour les procédés de thérapie cellulaire. Les différences réglementaires importantes d'un pays à l'autre sont actuellement le frein le plus important du marché de la thérapie cellulaire. L'harmonisation est prévue pour 2006.

L'importance des impacts du développement des procédés de la thérapie cellulaire est soulignée par le choix de la médecine cellulaire comme un des axes technologiques du pôle (projet mondial) Meditech Santé (Île-de-France).

L'horizon temporel prévisible de l'impact (apparition de nouveaux traitements médicaux) peut être estimé à 5 - 10 ans.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

Marché

La santé est le domaine d'application privilégié de la thérapie cellulaire. De nouveaux traitements pour les maladies neurodégénératives et les pathologies entraînant la destruction des cellules (infarctus, cirrhose, greffes de peau...) pourraient être mis au point via cette méthode.

Il s'agit d'un marché de niche. En 2002, la thérapie cellulaire représentait moins de 1 % des ventes du marché biopharmaceutique mondial, mais à long terme la résolution des principaux défis (scientifiques, réglementaires, éthiques) devrait contribuer à la croissance du marché. Le marché mondial de la thérapie cellulaire devrait avoisiner 26 Md€ en 2010.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, physico-chimie de la pharmacologie, neurosciences, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Méditech Santé (Île-de-France).

Liens avec (technologies) : thérapie génique.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : IGR (Institut Gustave Roussy), projet I-Stem.

Industriels : Myosix, Anosys, Innate Pharma. L'Association française contre les myopathies (AFM) a décidé de soutenir le projet I-Stem (Institut des cellules souches pour le traitement et l'étude des maladies monogéniques), avec l'Inserm et le Généthon : ce projet a pour objectif, durant les deux prochaines années, de s'assurer de la pertinence et de la faisabilité des recherches sur les cellules souches embryonnaires.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Advanced Cell Technology (États-Unis), Cythera (États-Unis), Novocell (États-Unis), Bresagen (Australie).

Commentaires

L'environnement académique français est particulièrement développé et performant : entre 2000 et 2004, l'IGR a déposé 41 brevets et effectué 2 247 publications. Par ailleurs, les acteurs industriels présents sur le territoire possèdent dans leur « pipeline » plusieurs produits en phase clinique (phases I et II). L'effort de recherche est à poursuivre dans ce domaine.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ; recherche et développement ; santé, action sociale.
--

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



46. Protéomique

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

La protéomique étudie des ensembles de protéines : leur rôle, leur structure, leur localisation, leurs interactions... Le développement de la protéomique repose sur les avancées technologiques et sur les progrès récents dans la connaissance des génomes. Plusieurs protéines peuvent être codées par un même gène, donc un organisme possède une très grande diversité de protéomes alors qu'il ne renferme qu'un seul génome.

Grâce aux techniques actuelles d'analyse et de séparation des protéines (électrophorèse bidimensionnelle, spectrométrie de masse) et grâce à la bioinformatique, on peut étudier, simultanément, des milliers de protéines. On peut ainsi identifier la protéine (ou les interactions entre différentes protéines) responsable(s) d'une maladie chez l'homme - pour mettre au point un médicament, par exemple - ou d'une propriété intéressante chez une plante.

Cette évolution correspond à une véritable rupture dans la vitesse d'acquisition des données protéomiques, ce qui ouvre des perspectives originales dans divers domaines : identification de nouvelles cibles thérapeutiques, mise en évidence de propriétés d'intérêt chez une plante (résistance à la sécheresse par exemple) ... D'autres domaines d'applications pourraient profiter des retombées de la protéomique : l'agroalimentaire (évaluation de la sécurité des aliments), le diagnostic clinique, la thérapie génique, la défense (lutte contre le bioterrorisme), l'oncologie, la prévention des maladies...

Enjeux, Impact

La protéomique fait partie des outils dont la maîtrise est essentielle car à l'origine des progrès dans les sciences du vivant et de la

santé. Le développement de ces technologies représente donc un enjeu pour le développement des sciences du vivant et des biotechnologies en France.

Par ailleurs, la protéomique est un moyen (avec la biologie structurale) de tirer parti des découvertes réalisées en génomique. Après le décryptage du génome humain, la maîtrise de cette technologie est donc cruciale pour le devenir des biotechnologies françaises.

L'horizon temporel prévisible de l'impact de cette technologie est de 5 - 10 ans.

Marché

Le marché mondial de la protéomique a été évalué en 2003 à 1,52 Md\$, et devrait atteindre 2,68 Md\$ en 2008. Ce marché très actif est en pleine croissance, à un taux de 12 % par an en valeur. La séparation et la caractérisation de protéines sont les deux segments principaux de ce marché. Ensemble, ils représentent près de 90 % du marché global.

Le marché européen représente 40 % du marché mondial (45 % pour les États-Unis et 10 % pour le Japon).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, neurosciences, médecine et odontologie, informatique.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, informatique, ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires, environnement-pollution.

■ Pôles de compétitivité : Innovations thérapeutiques (Alsace), Méditech Santé (Île-de-France).

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

■ Liens avec (technologies) : génomique fonctionnelle à grande échelle ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; vaccins recombinants ; gestion et diffusion des contenus numériques.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Génopole d'Évry, Institut Pasteur, Rhône-Alpes Génopole.

Industriels : Biomérieux, Hybrigenics, Proteus, Sanofi-Aventis.

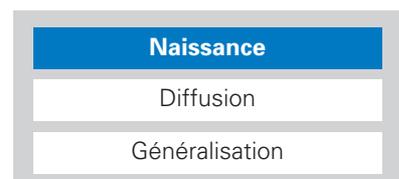
■ Exemples d'acteurs dans le monde : Amersham Pharmacia Biotech/Amersham

PLC. (Royaume-Uni), Agilent Technologies (États-Unis), Genomic Solutions INC. (États-Unis), Zyomyx (États-Unis).

Commentaires

Cette technologie fait appel à des compétences multidisciplinaires (génomique, informatique, biologie structurale...) : il est essentiel de réunir ces compétences pour développer cette technologie. Les plates-formes des génopoles d'Évry et de Grenoble s'inscrivent dans cette démarche.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



47. Thérapie génique

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

La thérapie génique consiste à introduire dans une cellule cible un gène d'intérêt thérapeutique pour qu'il produise une protéine manquante (cellule déficiente) ou un signal qui conduira à la mort cellulaire (cellule infectée ou cancéreuse).

La thérapie génique repose sur :

- un gène-médicament ;
- un vecteur pour le transporter ;
- une cellule cible où le gène puisse s'exprimer.

Les maladies concernées par la thérapie génique sont extrêmement nombreuses et variées : cancers, maladies cardiovasculaires, maladies infectieuses, maladies génétiques, maladies auto-immunes...

Aujourd'hui, une meilleure connaissance des voies d'insertion des vecteurs et de la localisation dans le génome du gène pathologique est indispensable au développement de cette méthode. Les systèmes de transferts de gènes doivent être sûrs, efficaces, capables d'exercer leur fonction dans des cellules qui ne se divisent pas et assurer la stabilité de l'expression du gène thérapeutique.

Enjeux, Impact

La thérapie génique est susceptible de répondre à un enjeu essentiel de santé publique, par exemple développer de nouveaux traitements médicaux (le spectre des maladies concernées par la thérapie génique est très large), et plus précisément trouver des solutions pour certaines maladies pour lesquelles aucun autre type de traitement n'a pu être mis au point.

Il convient de noter que les enjeux éthiques relatifs à cette technologie sont très importants. Le risque d'eugénisme lié à la pratique de la thérapie génique est grand. Le CCNE

(Comité consultatif national d'éthique) a demandé l'exclusion de la thérapie génique germinale (la thérapie génique germinale est la modification du capital génétique des cellules reproductives, ovocytes et spermatozoïdes et leurs précurseurs, ce qui aurait pour conséquences une modification du génome de tout l'individu). Par ailleurs, le CCNE a émis plusieurs avis demandant la prudence quant à l'utilisation et à la « médiatisation » de la thérapie génique. La thérapie génique n'est pas la solution miracle, et la déception provoquée par les premiers échecs peut être encore plus grande que l'espoir soulevé, notamment auprès des malades et de leurs familles.

L'horizon temporel prévisible de l'impact (mise au point de nouveaux traitements médicaux) est de 5 - 10 ans.

Marché

Le marché de la thérapie génique est celui de la santé, et les domaines d'application d'une telle technique sont très variés : diabète, maladie de Parkinson, myopathie de Duchenne, hémophilie A, mucoviscidose, maladies cardiovasculaires, maladies infectieuses (sida, hépatite B, paludisme...), cancers...

En 2005, 425 essais cliniques sont en cours dans le monde : 66 % concernent le traitement de cancers, 9 % des maladies héréditaires monogéniques, 8 % des maladies cardiovasculaires et près de 7 % des maladies infectieuses. Seuls 18 de ces 425 essais cliniques sont en phase III. La grande majorité est en phase I (63 %), ce qui traduit la nature émergente de cette technologie (Pour en savoir plus www.wiley.co.uk/genmed/clinical/).

Le marché mondial des produits issus de la

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

thérapie génique a été évalué à 5,73 Md\$ pour 2011.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, neurosciences, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, biotechnologies.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : thérapie cellulaire, vectorisation.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inserm, Généthron, UTCG (Nantes).

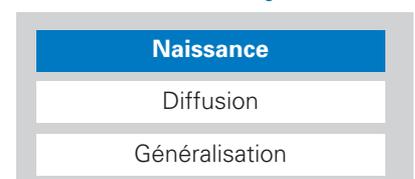
Industriels : Cayla, Celectis, Genopoïtic, In-Cell-Art, Sanofi-Aventis, Transgène.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Avigen (États-Unis), Cell Genesys (États-Unis), Introgen Therapeutics (États-Unis), Genvec (États-Unis), Vical (États-Unis).

Commentaires

L'environnement français est particulièrement bon dans ce domaine, tant au niveau académique qu'au niveau industriel. En 2000, les premiers essais ont été réalisés en France, à l'hôpital Necker, sur les « bébés-bulles » par l'équipe du professeur Alain Fisher. Ces essais ont depuis été interrompus après l'annonce d'un premier cas de leucémie chez un des dix patients traités. Au niveau industriel, l'entreprise Transgène mène actuellement plusieurs essais cliniques (1 en phase I, 3 en phases II, 1 en phase III). Sur les 425 essais cliniques en cours dans le monde, 18 sont réalisés en France.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



48. Génomique fonctionnelle à grande échelle

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La génomique fonctionnelle étudie la fonction des gènes, leur expression, leur régulation, et leur interaction. Elle nécessite l'étude des ensembles de protéines issues des gènes. Le génotypage est une approche qui permet de caractériser les variations génétiques dans le génome humain et d'identifier les mutations qui sont impliquées dans l'apparition de maladies.

Grâce à la mise en place, au niveau mondial, d'infrastructures à grande échelle comme support, le génotypage s'affirme maintenant comme une méthodologie clé dans l'étude des maladies multifactorielles complexes (maladies cardiovasculaires, diabète, asthme, cancer...).

Les technologies de génotypage, appliquées à l'étude des maladies, peuvent être transférées à d'autres secteurs, notamment le secteur agronomique (plantes, animaux domestiques) mais également dans le domaine judiciaire (empreinte génétique).

Actuellement, les développements en cours en France intéressent les méthodologies de détection rapide (et à grande échelle) des mutations, à faible coût, notamment par spectrométrie de masse Maldi (*Matrix-assisted desorption/ionization*).

Cette approche va s'enrichir progressivement, au cours des prochaines années, de nouvelles technologies de génomique fonctionnelle (phénotypage moléculaire) qui vont renforcer la puissance des études génétiques. Le phénotypage moléculaire nécessite, au départ, l'analyse de très grandes cohortes de populations pour établir des corrélations fiables entre des biomarqueurs spécifiques particuliers et le risque de progression d'une maladie ou la réponse thérapeutique.

Enjeux, Impact

Dans le domaine de la santé, l'émergence de ces technologies à grande échelle, qui fait suite au séquençage complet du génome humain, conduit à une réorganisation fondamentale de la recherche biomédicale au niveau mondial. Elle constitue un secteur stratégique pour le développement de tests de diagnostic des maladies, de médicaments hautement spécifiques, avec comme objectif, à l'horizon 2015, la mise en place des premiers protocoles de médecine personnalisée.

Dans le domaine de l'agriculture et de l'agroalimentaire, l'enjeu pour ces techniques est la mise au point de nouvelles cultures aux performances améliorées (qualités nutritives augmentées, augmentation des rendements, diminution du besoin de pesticides et d'engrais...). Les recherches en génomique peuvent servir à améliorer les outils d'évaluation de la sécurité des nouveaux aliments.

En cela, cette technologie aura un impact sur la santé (mise au point de nouveaux traitements médicaux) et sur la qualité sanitaire et nutritionnelle des aliments, qui se trouveront améliorés.

L'horizon temporel prévisible de l'impact peut être estimé à 5 - 10 ans, voire 15.

Marché

Cette technologie peut être appliquée à trois domaines :

- la santé : traitement de maladies complexes (maladies cardiovasculaires, diabète, asthme, cancer...) ;
- l'agriculture et l'agroalimentaire : amélioration des plantes, amélioration des produits animaux ou végétaux destinés à la consommation humaine... ;

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

- la justice : empreintes génétiques.

Le marché potentiel est donc considérable, dans la mesure où les applications visées touchent notamment à des problèmes de santé très répandus dans les pays développés (diabète, cancer, maladies cardiovasculaires).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, chimie analytique, sciences médicales et alimentation, neurosciences, médecine et odontologie, biologie des populations et écologie, informatique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : informatique, analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Innovations thérapeutiques (Alsace), Innovation dans les céréales (Auvergne), Méditech Santé (Île-de-France), Prod'Innov (Aquitaine).

■ Liens avec (technologies) : transgénèse ;

traçabilité ; technologies d'authentification ; protéomique ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; modélisation, simulation, calcul.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CNG, CNRS, Génoplante, Inra, Institut Curie, IRD.

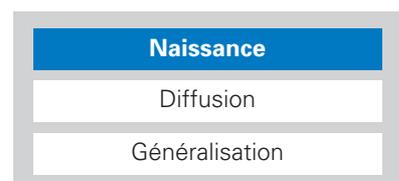
Industriels : Biogemma, Limagrain, Sanofi-Aventis, Genfit.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Aclara Biosciences (États-Unis), Affymetrix (États-Unis), Caliper Technologies (États-Unis), Diversa (États-Unis), Incyte Pharmaceuticals (États-Unis).

Commentaires

La France, en 5^e position, avec 5,9 % de la production mondiale en terme de publications, possède dans le domaine de la génomique un écosystème académique particulièrement riche. Le Centre national de génotypage (CNG) a été un des deux premiers centres mondiaux (le second étant aux États-Unis) créés dans le domaine du génotypage, en 1997.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



49. Techniques de criblage et de synthèse à haut débit

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Par techniques de criblage et de synthèse à haut débit on entend :

- le criblage à haut débit (HTS - *High Throughput Screening*) réel. Le développement de la génomique et de la protéomique a conduit à la découverte de nombreuses cibles thérapeutiques, constituant ainsi des ciblothèques. Parallèlement, les progrès de la chimie combinatoire (méthode de recherche pharmaceutique qui consiste à synthétiser, de manière automatique, un grand nombre de molécules de structures apparentées) ont permis de synthétiser des banques de molécules, potentiellement actives, à tester. Pour tirer partie de ces améliorations, des techniques de tests à haut débit (criblage) sont mises en place pour découvrir, à partir de ces chimiothèques et de ces ciblothèques, des molécules aux propriétés nouvelles biologiquement actives.

Les verrous principaux qui freinent le développement de ces technologies sont techniques. Ils concernent :

- le choix de la cible : une des questions est de savoir s'il est préférable de choisir une cible issue de la génomique ou de privilégier l'étude d'une cible connue ayant déjà apporté des résultats intéressants. Par ailleurs, manipuler un seul gène cible ou une seule protéine cible ne permettra pas, dans tous les cas, d'obtenir des résultats satisfaisants (cas des maladies multifactorielles) ;
- la mise au point d'essais biologiques robotisés pertinents : il est bien sûr intéressant de mettre au point des tests permettant d'évaluer l'activité mais aussi la toxicité, l'absorption, la distribution, la métabolisation du composé en vue des essais cliniques ;
- la gestion de la masse de données produi-

tes (jusqu'à 50 à 100 000 molécules par mois et par chercheur) ;

–l'approvisionnement en molécules : la tendance est plutôt à la conception rationnelle de chimiothèques ciblées, de plus petite taille.

Cette technique de criblage à haut débit a été étendue à d'autres domaines des biotechnologies, comme la mutagenèse dirigée qui nécessite des outils de tests à très haut débit ;

- le criblage virtuel. Il s'agit d'une modélisation (simulation virtuelle) de l'action thérapeutique de molécules sur une cible, qui pourrait se substituer en partie aux essais réalisés in vitro, ou du moins avoir pour objectif d'effectuer une présélection des molécules à tester in vitro. On parle de tests in silico. Cette technologie fait appel aux progrès récents de plusieurs disciplines : la biologie moléculaire, la biologie structurale (détermination de la structure tridimensionnelle de la cible), la bioinformatique, les mathématiques (voir la fiche Modélisation, simulation, calcul) ;

- l'expérimentation à haut débit (HTE - *High Throughput Experimentation*). Cette technologie a pour but d'accélérer le processus de recherche principalement en catalyse et en chimie des matériaux en vue de la mise au point de procédés de production. La technologie repose sur l'utilisation des outils de la chimie combinatoire pour accélérer la recherche de nouvelles conditions opératoires pour des réactions généralement connues, et notamment la recherche de nouveaux catalyseurs. L'expérimentation à haut débit permet de découvrir des systèmes catalytiques nouveaux et/ou des conditions opératoires performantes très rapidement.

Ces technologies font appel à de multiples disciplines comme la génomique, la protéomique, la robotique, les microsystèmes (déve-

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

loppement de systèmes miniaturisés, MEMS-*Micro-electro-mechanical-systems*), la microfluidique, la chimie, la bioinformatique...

Enjeux, Impact

Les enjeux de la maîtrise de ces technologies sont les suivants :

- il s'agit de rendre les domaines d'application (*drug discovery*, chimie, catalyse, matériaux...) plus compétitifs en diminuant les coûts associés et en augmentant la vitesse des découvertes (*time to market*) : il est évident que celui qui découvrira le plus rapidement et produira les principes actifs agrochimiques ou pharmaceutiques par le procédé le moins onéreux remportera le marché. L'enjeu est grand si l'on sait que les plus grands *block busters* pharmaceutiques rapportent chacun 5 ou 6 Md\$ par an ;
 - dans le domaine de la chimie, l'amélioration de procédés catalytiques est un domaine clé de la recherche chimique, étroitement lié à la propriété industrielle. D'après les *Chemical Abstracts*, les brevets les plus consultés dans le monde sont régulièrement des brevets de méthodologie de synthèse en catalyse. Ils se classent devant les brevets de chimie médicinale. L'importance des impacts du développement des procédés catalytiques est soulignée par le choix de la catalyse comme un des trois axes technologiques du pôle à vocation mondiale « chimie environnement Lyon Rhône-Alpes » (Axelera) ;
 - le développement d'industries connexes (fabrication de robots de criblage, de synthèse, logiciels...) contribue à pérenniser et développer ces secteurs industriels.
- L'horizon temporel prévisible de la maîtrise de certaines de ces technologies est assez proche (moins de 5 ans), notamment pour la santé (découverte de nouveaux traitements) et les biotechnologies. Pour la chimie, l'horizon est plus lointain : de 5 à 10 ans.

Marché

Les domaines d'application de ces technologies sont la pharmacie et l'agrochimie (découverte de nouveaux médicaments, herbicides, insecticides, fongicides...), les biotechnologies (mutagenèse dirigée, par exemple), la chimie (mise au point de procédés catalytiques et de matériaux innovants).

Le marché européen du criblage à haut débit (découverte de principes actifs) a été estimé à 377 M€ et devrait augmenter pour atteindre 722 M€ en 2010. Le marché du HTE est lui encore émergent, sa croissance est à prévoir dans les années à venir. Globalement, le marché de ces technologies est un marché à fort potentiel.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, sciences médicales et alimentation, physico-chimie de la pharmacologie, médecine et odontologie, chimie moléculaire, chimie analytique, informatique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, informatique, analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, chimie organique, biotechnologies.

■ Pôles de compétitivité : Innovations thérapeutiques (Alsace), Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : protéomique ; génomique fonctionnelle à grande échelle ; microtechnologies pour l'intensification des procédés ; transgénèse ; modélisation, simulation, calcul ; acquisition et traitement de données.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA (GCC : Groupe de chimie combinatoire et de criblage à haut-débit), CIT (Rennes, HTE), Institut Gilbert Laustriat (Criblage et chimiothèque nationale, Strasbourg), LOF Rhodia-CNRS (HTE), RMNT (Réseau Micro Nano Technologies).

Industriels : Cerep, Hybrigenics, Biométhodes (Massive Mutagenesis® - Demande PCT WO 02/16606 - technologie phare de Biométhodes, est la seule technologie de mutagenèse dirigée combinatoire à haut débit), Rhodia (HTE).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : HTS : Aclara Biosciences (États-Unis), Discovery Partners (États-Unis), Vertex Pharmaceuticals (États-Unis), Euroscreen (Belgique), Interbioscreen (Russie) ; HTE : DSM (Pays-Bas) et probablement les différentes grandes entreprises du même secteur comme Degussa (Allemagne), Avantium (Pays-Bas), Symyx (États-Unis)... Certains laboratoires du Massachusetts Institute of Technology à Boston.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien ; chimie, caoutchouc, plastiques ; fabrication de composants électroniques ; recherche et développement.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



50. Vectorisation

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

La vectorisation est une technologie qui permet d'améliorer l'efficacité d'un principe actif en augmentant sa biodisponibilité, par exemple en augmentant la fraction du principe actif captée par l'organisme sous sa forme pharmacologiquement active, non dégradée. Il s'agit plus précisément de promouvoir le passage à travers les membranes et/ou les cellules d'un principe actif, en le protégeant de la dégradation par les enzymes (enzymes du foie notamment). Les principaux domaines d'application sont la pharmacie (délivrance de médicaments), l'agriculture (délivrance de pesticides, engrais,...) et la cosmétique.

Dans le domaine de la santé, la mise en place de systèmes de délivrance moins contraignants pour les patients correspond aussi à une voie de recherche : l'insuline inhalée par exemple représente pour les patients diabétiques un réel progrès par rapport à l'injection. Les formes galéniques d'insuline « retard » qui réduisent le nombre d'injections nécessaires sont aussi issues de travaux de vectorisation de cette protéine.

Plusieurs types de techniques ont été développés :

- encapsulation du principe actif ;
- modification chimique du principe actif ;
- système d'administration (patch, spray, implantation d'appareils dans l'organisme pour libérer le principe actif directement sur la cible) ...

Ces techniques font appel à des disciplines variées : biotechnologies, chimie, microsystèmes et microfluidique, nanotechnologies, physico-chimie, thérapie génique...

Outre le coût de production (investissements lourds, de plusieurs dizaines de M) et la complexité de tels systèmes, des ver-

rous technologiques subsistent et ralentissent leur apparition sur le marché : difficulté à maîtriser les aspects toxicologiques, la biocompatibilité (des matériaux d'encapsulation, par exemple), la métabolisation du système, la biodégradabilité des matériaux utilisés.

Enjeux, Impact

Dans les années à venir, plusieurs opportunités susceptibles de contribuer au développement de la vectorisation vont se présenter :

- entre 2004 et 2008, de nombreux brevets de médicaments à forte rentabilité (*block busters*) vont tomber dans le domaine public : ceci devrait correspondre à une perte de 40 Md\$ pour leurs possesseurs. La vectorisation peut être une bonne opportunité pour contrecarrer ce phénomène. De nouveaux brevets revendiquant de nouvelles formes « vectorisées » de molécules tombant dans le domaine public pourront être déposés ;

- par ailleurs, le marché des protéines thérapeutiques est en pleine croissance (taux de 10,5 % par an entre 2003 et 2010) : ces « grosses » molécules traversent les membranes et pénètrent difficilement dans les cellules d'où un besoin de vectorisation ;

- enfin, l'amélioration du confort des patients, grâce à la mise en œuvre de systèmes moins contraignants pour des maladies telles que le diabète, est un point important étant donné le vieillissement de la population et le développement de cette maladie dans les pays développés (le nombre de patients diabétiques (type II) devrait doubler entre 2002 et 2022).

L'enjeu est de ne pas laisser échapper ces opportunités pour renforcer la compétitivité française de ce secteur.

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

Dans le domaine de l'agriculture, l'enjeu de la maîtrise de cette technologie est de diminuer la quantité de produits utilisés pour faciliter les cultures (insecticides, pesticides...) en les délivrant de manière plus efficace. La vectorisation appliquée à ce domaine s'inscrit dans le cadre du développement durable. L'horizon temporel prévisible de l'impact de cette technologie est de 5 ans.

Marché

Les marchés de la vectorisation sont la santé (nouveaux traitements contre le cancer et le diabète, mais aussi la mise au point de nouveaux systèmes de distribution de médicaments déjà existants), l'agriculture (herbicides et insecticides plus efficaces) et la cosmétique (la cosmétique a été la première industrie à produire des liposomes en grande quantité).

Le marché mondial de la vectorisation pour la santé a été estimé, pour 2009, à 67 Md\$. Étant donné les enjeux présentés dans le paragraphe précédent, il convient de noter qu'il s'agit d'un marché à très fort potentiel.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, sciences

médicales & alimentation, physico-chimie de la pharmacologie, médecine et odontologie, chimie physique, chimie analytique, chimie moléculaire.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, chimie organique, chimie macromoléculaire, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Cosmetic Valley (Interrégional), Lyonbiopôle (Rhône-Alpes), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : thérapie génique ; ingénierie des anticorps monoclonaux ; micro et nanocomposants.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CNRS, Généthon, Inra, Inserm.

Industriels : Centillion (filiale de Sanofi-Aventis), Chelatec, Debiopharm, Flamel Technologies, In-Cell-Art, L'Oréal, Nanovec, Nicox, Pharmavectys, Speregène, Virsol.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Altea Therapeutics (États-Unis), Alza (États-Unis), AP Pharma (États-Unis), Aradigm (États-Unis), Emisphere Technologies (États-Unis), Noven Pharmaceuticals (États-Unis), Transpharma Medical (Israël).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; industrie pharmaceutique ; fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien ; recherche et développement.
--

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



51. Ingénierie des anticorps monoclonaux

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Un anticorps est une substance synthétisée par certaines de nos cellules (lymphocytes) en réponse à une stimulation par une substance étrangère à notre organisme. Un anticorps est monoclonal quand ses extrémités ne peuvent se fixer que sur un seul antigène (un antigène est une substance capable de déclencher une réponse immunitaire).

Produits par clonage d'une cellule spécialisée, les anticorps monoclonaux reconnaissent un antigène bien déterminé. Aujourd'hui, on a réussi, par exemple, à construire des anticorps monoclonaux spécifiques d'un gène surexprimé dans certains cancers du sein. Ces nouveaux médicaments ciblent précisément les cellules impliquées dans le mécanisme de développement de la tumeur et les détruisent. Les anticorps monoclonaux ont été au fil du temps perfectionnés. Après les anticorps monoclonaux d'origine animale, des anticorps monoclonaux humanisés puis humains ont vu le jour. Outre la mise au point d'anticorps le plus humanisés possible, l'effort à fournir aujourd'hui concerne l'utilisation de fragments d'anticorps.

La production des anticorps monoclonaux nécessite une augmentation importante des capacités de production utilisant les cellules de mammifères.

Enjeux, Impact

L'enjeu pour la France de la maîtrise de cette technologie est de contribuer au développement de nouveaux biomédicaments, pouvant devenir des *block busters* du fait des maladies visées (le spectre des maladies potentiellement traitées par des anticorps monoclonaux est très large et inclut notam-

ment les maladies des pays développés tels que les cancers).

L'horizon temporel prévisible de l'impact de la maîtrise de cette technologie est de 5 ans.

Marché

Les maladies susceptibles d'être soignées par ce type de traitement sont extrêmement nombreuses : les maladies infectieuses, les cancers, certains lymphomes, certaines leucémies, le rejet de greffe de rein, la maladie de Crohn, la polyarthrite rhumatoïde...

Du fait de leur capacité à reconnaître spécifiquement un motif moléculaire particulier, les anticorps monoclonaux sont des acteurs privilégiés dans la détection des molécules et le diagnostic. Ils sont utilisés dans de nombreux tests de dépistage comme, par exemple, les tests de type Elisa (*Enzyme Linked Immunosorbant Assay* ; c'est le type de test notamment utilisé pour le dépistage de la séropositivité au virus VIH) et ce, aussi bien dans le domaine médical que dans le domaine agroalimentaire.

Les anticorps monoclonaux représentaient environ 14 % du marché biopharmaceutique en 2002, contre 1 % en 1995. Les ventes mondiales des anticorps monoclonaux ont enregistré une croissance annuelle de 147 % entre 1995 et 2002. Plus de 113 anticorps monoclonaux sont actuellement en développement clinique dont 74 % sont en phase II et III. Entre 29 et 47 nouveaux anticorps monoclonaux devraient arriver sur le marché entre 2004 et 2009. Le marché mondial des anticorps monoclonaux a été estimé à 5,1 Md\$, en 2003.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

des organismes, sciences médicales et alimentation, physico-chimie de la pharmacologie, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire).

■ Liens avec (technologies) : contrôle des allergies alimentaires ; vectorisation.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, Inra, Institut Pasteur.

Industriels : Biocytex, Génopoeitic, Monoclo-

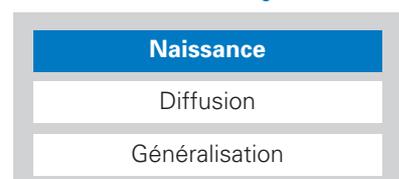
nal Antibodies Thérapeutics, Paris, Proteogénix.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Amgen (États-Unis), Genzyme (États-Unis), Johnson & Johnson (États-Unis), Novartis (Suisse), Roche (Suisse).

Commentaires

Il existe un fort décalage entre le haut niveau de connaissance académique français et le faible développement industriel dans ce domaine. Le transfert de technologie et plus précisément les problèmes de production de masse d'anticorps monoclonaux semblent expliquer ce phénomène.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



52. Vaccins recombinants

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Les nouvelles générations de vaccins vivants sont fabriquées grâce aux techniques de recombinaison génétique telles que les techniques expérimentales d'assemblage de séquences d'ADN non contiguës à l'état naturel. Par rapport aux techniques traditionnelles de conception de vaccins, la conception de vaccins par génie génétique permet aux chercheurs de contrôler avec plus de précision les caractéristiques du vaccin. Il n'est plus nécessaire d'utiliser le virus entier, seul l'antigène (substance capable de déclencher une réponse immunitaire) est inséré. Les techniques mises au point grâce à la transgénèse permettent de créer des vaccins de plus en plus complexes, susceptibles d'immuniser le patient contre plusieurs antigènes simultanément.

Les vaccins recombinants se veulent plus sûrs et plus efficaces que les vaccins traditionnels. Bien que nécessitant des méthodes de production innovantes, les vaccins recombinants ne seraient pas plus coûteux que les vaccins classiques.

Le premier vaccin recombinant humain mis sur le marché a été celui de l'hépatite B. Le vaccin anticoqueluche a suivi.

L'un des verrous à l'utilisation de cette technologie est l'acceptation du public. Il s'agit de produits mis au point grâce à la transgénèse et le grand public n'est peut-être pas encore prêt à accepter les risques liés aux OGM. Par ailleurs, la mise au point d'un vaccin est extrêmement longue (entre 10 et 15 ans), ce qui peut dissuader les investisseurs de mettre les capitaux nécessaires au développement de tels produits.

Enjeux, Impact

Il existe encore de grandes maladies infec-

tieuses, comme le sida, la malaria et la tuberculose, pour lesquelles on ne dispose encore d'aucun vaccin efficace. L'enjeu de cette technologie est donc de mettre au point des nouveaux traitements médicaux innovants et peu coûteux susceptibles d'enrayer ces épidémies ravageuses.

Certains vaccins sont déjà disponibles (hépatite B, anticoqueluche), mais des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires pour augmenter l'impact de cette technologie sur la santé publique. L'horizon temporel prévisible de l'impact de cette technologie est probablement de plus de 10 ans.

Marché

Le marché est principalement celui des maladies infectieuses : il est à l'échelle de la gravité des maladies qui restent sans vaccin efficace aujourd'hui : sida (40 millions de malades dans le monde), malaria (un million de morts par an en Afrique), tuberculose (huit millions de nouveaux malades chaque année)...

Parallèlement, le marché des cancers est également visé. Les premiers vaccins visant à stimuler le système immunitaire contre les tumeurs cancéreuses seront disponibles en 2006 aux États-Unis.

En 2002, les vaccins recombinants représentaient 4 % du marché biopharmaceutique. 87 traitements potentiels étaient en cours d'essais cliniques en 2002. 19 vaccins recombinants devraient être mis sur le marché entre 2004 et 2009 selon une hypothèse basse contre 32 selon une hypothèse haute.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie, biologie des populations et écologie.

■ Compétences technologiques : ingénierie médicale, biotechnologies, pharmacie-cosmétiques.

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

■ Liens avec (technologies) : protéomique ; transgène.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Institut Pasteur. Industriels : Sanofi-Pasteur, Biomérieux, Merial, Pierre Fabre, IDM, Transgène.

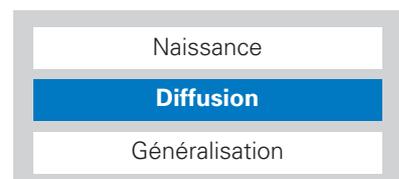
■ Exemples d'acteurs dans le monde :

Acambis (Royaume-Uni), Bavarian Nordic (Danemark), Glaxomithklime (Royaume-Uni), Medigene (Allemagne), Novaxax (États-Unis), Xenova (Royaume-Uni).

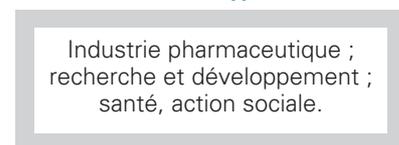
Commentaires

L'écosystème français est particulièrement riche avec les leaders mondiaux du domaine (Sanofi-Pasteur 23 % du marché mondial, Biomérieux, Merial). Le pôle de compétitivité Lyonbiopôle, projet mondial, qui vise à conforter le leadership mondial du territoire rhodanien dans les vaccins et le diagnostic, témoigne du potentiel scientifique, technique et industriel français sur le sujet.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



53. Alimentation pour le bien-être et la santé

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

L'alimentation participe activement à la santé. Hippocrate l'affirmait déjà : « Que ton aliment soit ta première médecine. » Toutefois, la notion d'aliment santé (ou aliment fonctionnel) a émergé seulement récemment, accompagnant une rupture des habitudes alimentaires où l'argument santé devient un élément de choix des consommateurs. Au-delà de la satisfaction des stricts besoins nutritionnels, l'alimentation devient un moyen d'améliorer le bien-être, de maintenir un bon état de santé, voire de réduire le risque de certaines maladies.

Un aliment est dit fonctionnel si :

- il contient un constituant qui affecte une ou un nombre limité de fonctions dans l'organisme selon un mécanisme tel qu'il a un effet positif ;
- il a un effet physiologique ou psychologique qui va au-delà de l'effet nutritionnel traditionnel.

Les aliments pour la santé peuvent être classés en trois catégories : les aliments de l'équilibre et du bien-être (aliments nutritivement corrects, porteurs d'image santé), les aliments du rééquilibrage et du retour au bien-être (aliments de régime minceur, de régime tonique, de régime confort...) et les aliments de santé (aliments de prévention du risque).

Enjeux, Impact

Les enjeux pour la France de la maîtrise de cette technologie sont multiples :

- répondre à la demande des consommateurs qui accordent de plus en plus d'importance à la valeur santé de leur alimentation ;
- permettre de répondre aux besoins d'une partie de la population contrainte de suivre un régime alimentaire particulier (lutter contre l'obésité, par exemple. Il est, en effet,

urgent de prendre en compte ce problème de santé publique : selon l'Inserm, le nombre d'enfants obèses est passé de 5 à 13 % en 10 ans) ;

- mettre en place des stratégies efficaces de prévention des maladies typiques de nos sociétés industrialisées et accompagner le vieillissement des populations occidentales en leur assurant la meilleure qualité de vie possible pour réduire les dépenses de santé. La réglementation, qui doit veiller à la non-tromperie du consommateur, fait l'objet de nombreuses réflexions et est en pleine évolution. Elle devrait se stabiliser dans les années à venir. Cette amélioration passera par une concertation large entre les autorités administratives nationales (Afssa, Agence française pour la sécurité sanitaire des aliments) et internationales, les scientifiques, les industriels et les consommateurs.

Le développement de cette technologie représente pour l'industrie agroalimentaire un créneau d'innovation de première importance, lui ouvrant des marchés à haut potentiel de croissance. L'horizon temporel prévisible de l'impact de cette technologie est de 5 à 10 ans.

Marché

Le marché mondial de l'aliment santé représentait en 2004 un chiffre d'affaires compris entre 55 et 96 Md selon les définitions plus ou moins restrictives que l'on donne à ce terme, et devrait connaître une croissance annuelle de 20 % dans les dix prochaines années. D'ici à 2011, de 6 à 10 % du marché alimentaire total sera ainsi constitué d'aliments santé. Ce marché en pleine croissance est soutenu par une forte demande du consommateur. Selon une étude du Crédoc (Centre de recherche pour l'étude et l'obser-

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

vation des conditions de vie ; 1999), 77 % des Français sont prêts à payer au prix fort le produit qui apporte du bénéfice pour la santé.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : Cancer-Bio-Santé

(Midi-Pyrénées, Limousin), Vitagora (Bourgogne), Prod'innov (Aquitaine), L'aliment de demain (Bretagne), Nutrition santé longévité (Nord-Pas-de-Calais).

■ Liens avec (technologies) : contrôle des allergies alimentaires ; traçabilité, transgénèse.

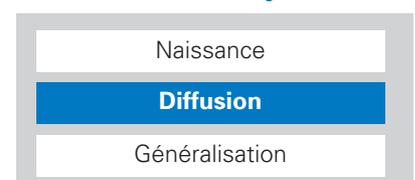
■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CNRS, Inra, Institut Pasteur.

Industriels : Danone, Valorex.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Kellogg's (États-Unis), General Mills (États-Unis).

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



54. Contrôle des allergies alimentaires

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

Une augmentation significative du nombre de cas d'allergies alimentaires recensés a pu être constatée : entre 1982 et 1995, le nombre de formes sévères aurait été multiplié par un facteur 5. Prendre en compte les problèmes d'allergie alimentaire est un des objectifs fixés en 2001 dans le cadre du PNNS (Plan national nutrition-santé).

Il est important que les industriels, distributeurs et professionnels de la restauration collective se mobilisent pour maîtriser le risque allergène.

Les évolutions des habitudes alimentaires constituent vraisemblablement la principale cause du développement des allergies alimentaires. Les procédés de transformation et les interactions entre ingrédients et additifs sont également suspectés, même si leurs impacts sur l'allergénicité sont encore difficiles à évaluer.

Une recherche sur les mécanismes de l'allergie alimentaire est indispensable car une meilleure compréhension de la physiopathologie est source d'innovation pour l'élaboration de méthodes de prévention mais aussi de traitement.

Au niveau de la pratique médicale et de la surveillance épidémiologique, la recherche fondamentale est insuffisante et la formation médicale initiale reste faible. L'absence de système de surveillance épidémiologique constitue également un handicap pour l'amélioration du diagnostic et de la prise en charge du patient.

Enjeux, Impact

Le contrôle des allergies alimentaires est important pour quatre raisons principales :

- cette pathologie peut être grave et parfois mortelle ;

- la prévalence de la maladie a sensiblement augmenté depuis une décennie ;

- la qualité de vie des malades et de leur entourage est influencée fortement et durablement ;

- le coût économique, actuellement non chiffrable, devient une préoccupation.

Face à ce problème de santé publique, l'industrie agroalimentaire doit :

- suivre et anticiper l'évolution de la réglementation concernant l'étiquetage des allergènes alimentaires ;

- mettre en place des procédures HACCP (*Hazard Analysis and Critical Control Point*) et intégrer le danger allergène dans les guides de bonnes pratiques d'hygiène (GBPH) ;

- saisir des opportunités de création ou de distribution de nouveaux produits antiallergiques.

Le cadre réglementaire européen est fixé par la nouvelle directive 2003/89/CE (modifiant la directive 2000/13/CE) qui concerne l'étiquetage et la présentation des denrées alimentaires, ainsi que la publicité faite à leur égard. La maîtrise de cette technologie aura un impact sur la qualité de vie des patients et sur la santé publique, avec un horizon temporel prévisible de 5 à 10 ans.

Marché

En France, on estime à 3,2 % la prévalence d'allergies alimentaires évolutives dans la population générale et à 8 % dans la population pédiatrique. Aujourd'hui, lorsqu'une personne souffre d'allergie alimentaire le seul traitement efficace est de suivre un régime d'éviction.

Le marché des produits « antiallergie » est aujourd'hui encore émergent (restauration collective réservée aux enfants souffrant d'allergies alimentaires...).

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie, biologie des populations et écologie.

■ Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, produits agricoles et alimentaires.

■ Pôles de compétitivité : nutrition santé longévité (Nord-Pas-de-Calais).

■ Liens avec (technologies) : transgénèse ; traçabilité ; alimentation pour le bien-être et la santé ; ingénierie des anticorps monoclonaux ; technologies d'authentification.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Afssa (www.afssa.fr), CEA, CHU Nancy, Inra, Inserm.

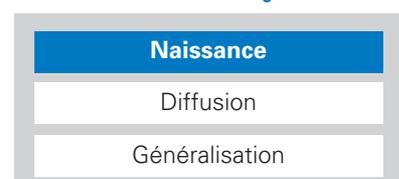
Industriels : Nutrinov, Phylogène, Protéaxis, Valpiform.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Nestlé (Suisse), HIPP (Royaume-Uni), McCain (Canada).

Commentaires

Les technologies visant au contrôle des allergies alimentaires bénéficient de la présence sur le territoire français de plusieurs acteurs reconnus qui portent l'innovation du secteur. Le secteur académique français est particulièrement riche.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies du vivant - santé - agroalimentaire



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

55. Imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant

Description

Les sciences du vivant sont porteuses de certains des plus forts potentiels de marchés industriels des années à venir. Notamment, les domaines de l'imagerie et de l'instrumentation couvrent l'essentiel de la progression attendue.

La présente fiche traite plus spécifiquement des technologies d'imagerie pour les sciences du vivant et la médecine et de l'instrumentation médicale.

Imagerie

Les techniques d'imagerie sont des outils d'analyse privilégiés dans les sciences du vivant et leur volet industriel (biotechnologies). Elles font appel à un grand nombre de technologies différentes, créant des images obtenues par des moyens physiques très variés. On distingue essentiellement deux processus utilisés : le spectre électromagnétique (visible, rayons X, microscope électronique, etc.) et l'acoustique (échographie). On distingue, entre autres :

- la microscopie optique. Utilisée dans toutes ses variantes, elle est un outil majeur de caractérisation : contraste de phase, microscopie interférentielle, microscopies confocales ;
- la microscopie électronique ;
- les techniques de tomographie (RMN, radiographie, ultrasons, traceurs radioactifs, PET) ;
- la radiographie ;
- l'imagerie infrarouge.

Les outils logiciels d'analyse d'image et d'assistance au diagnostic complètent la partie matérielle (comptage de cellules, séquençage d'ADN, etc.).

Instrumentation médicale

On classe également dans cette famille de technologies l'instrumentation associée aux sciences du vivant et à la médecine, notamment à la chirurgie assistée par ordinateur, à la chirurgie laser, à la chirurgie mini-invasive, au diagnostic (éventuellement réalisé à distance), à l'autodiagnostic, etc.

Ces technologies regroupent non seulement les matériels dédiés aux activités médicales et chirurgicales, les systèmes permettant d'établir par le patient lui-même un diagnostic fiable (par exemple, la mesure de la glycémie par les diabétiques), mais également les technologies logicielles permettant l'assistance aux actes chirurgicaux, l'archivage de données, ou encore les concepts d'organisation.

Si certaines techniques d'imagerie sont fonctionnellement au point, le passage de la chaîne d'imagerie d'un traitement humain à un traitement numérique ouvre de nouvelles voies de développement : méthodes de travail, analyse assistée par ordinateur...

Enjeux, Impact

Le domaine de l'instrumentation médicale recouvre un enjeu double pour la France. D'une part, l'évolution des techniques médicales et chirurgicales permet de meilleurs résultats dans le traitement des maladies, ou, dans le cas de la chirurgie mini-invasive, un traitement de la pathologie entraînant moins d'effets collatéraux (réduction des cicatrices, de la durée d'hospitalisation, etc.). D'autre part, l'instrumentation médicale représente un marché de première importance, en forte croissance du fait de l'augmentation de la demande des pays industrialisés et en passe de le devenir. Plus précisément, la maîtrise des technologies

Technologies du vivant - santé - agroalimentaire

permettant le diagnostic à distance, l'auto-diagnostic et la télémédecine est un enjeu majeur pour parvenir à maîtriser le coût de la santé dans nos sociétés où la population est vieillissante et la demande de soins a toutes les chances de croître.

Le maintien des équipes médicales et chirurgicales françaises à la pointe du développement des techniques thérapeutiques passe par des équipements au niveau de la prestation recherchée.

En ce qui concerne les technologies d'imagerie, l'enjeu majeur est de transformer une forte compétence de la recherche académique française dans le domaine en un potentiel industriel. Actuellement l'activité est essentiellement portée, en France, par des PME.

Promouvoir l'investissement sur ce type de technologies permet à la France de consolider sa position dans les domaines liés aux biotechnologies, qui sont une des clés de la croissance mondiale à moyen terme. L'impact de tels développements est donc direct en termes d'image et de compétitivité.

Marché

Le marché français de l'imagerie médicale in vivo représente une valeur d'environ 800 M€, pour un marché mondial de 20 Md€. Le marché de l'imagerie médicale est segmenté en trois grandes parties : l'endoscopie (invasif), pour 19 % ; l'imagerie classique (radiographie, échographie...), pour 59 % et les grands instruments (scanners X, IRM, PET), à hauteur de 22 %.

En parallèle, le marché français des instruments médicaux, hors imagerie, est de l'ordre de 4 Md€, pour un marché mondial de 100 Md€.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie, optique, informatique, traitement du signal, électronique, photonique,

optronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale,

■ Pôles de compétitivité : Biothérapies (Pays de la Loire), Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Innovations thérapeutiques (Alsace), Lyonbiopôle (Rhône-Alpes), Cancer-Bio-Santé (Midi-Pyrénées, Limousin), Elop-sys (Limousin, Midi-Pyrénées), Méditech Santé (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; interfaces humain-machine ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; capteurs intelligents et traitement du signal ; micro et nanocomposants ; procédés et systèmes de photonique.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, Cermep, Cran, Erim, Hôpital Broussais, Hôpital Pitié-Salpêtrière, Inria, Inra, Inserm, Leriss (Paris XII), Leti, Lure, Sim, TTI...

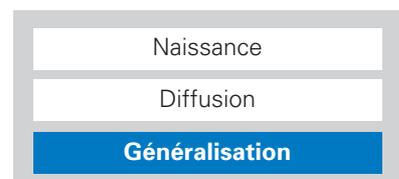
Industriels : GE Medical Systems, Imagine Eyes, Imasonic, Imstar, Mauna Kea, Nanobiogène, Philips Medical, Sanofi-Aventis, Snitem (www.snitem.fr), Thales Angénieux...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Barco (Belgique), Braun Aesculap (Allemagne), Leica (Allemagne), Siemens (Allemagne), Zeiss (Allemagne), General Electric (États-Unis), Toshiba (Japon), Nikon (Japon), Olympus (Japon), Philips (Pays-Bas).

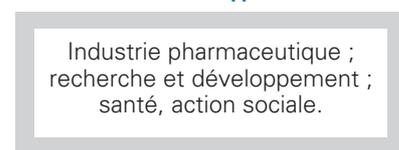
Commentaires

Sur ces technologies peu d'acteurs industriels français occupent des positions dominantes. Cependant, certains acteurs internationaux ont en France des sites de production ou de R&D. C'est le cas, par exemple, de General Electric ou de Philips. Cette situation est paradoxale quand on constate que la France possède une forte expertise académique dans les domaines connexes à ces technologies (Inria, Inserm, CEA, universités, etc.).

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application

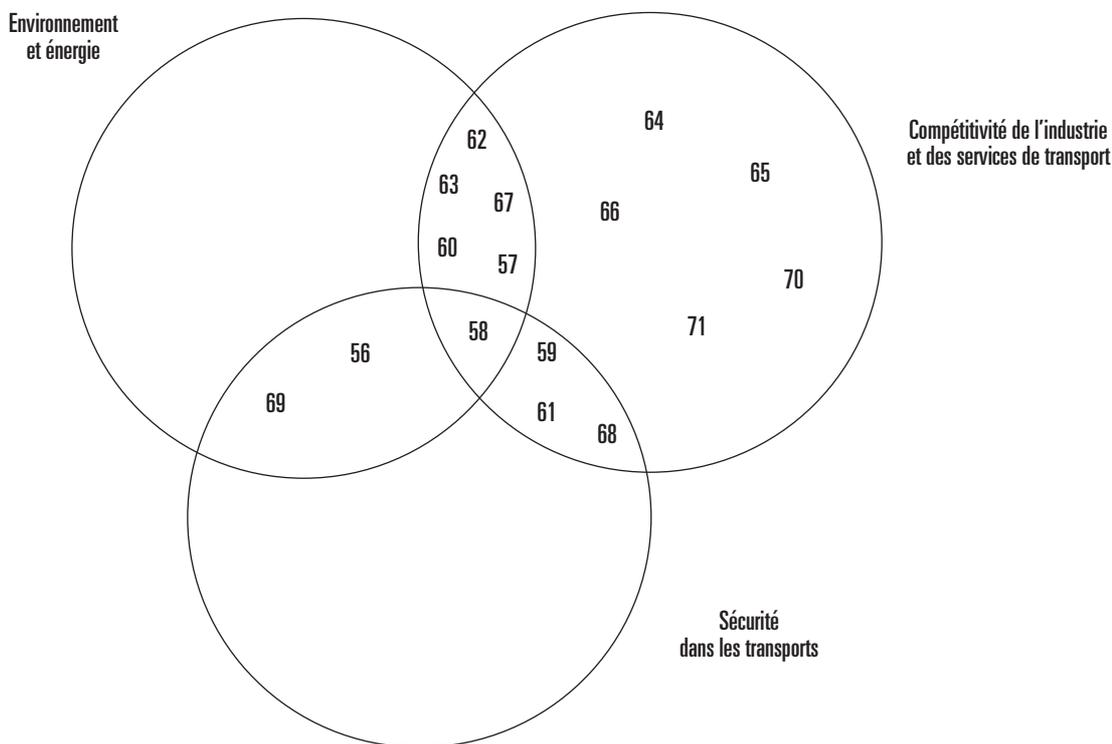




Transport

- 56 Architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre
- 57 Travaux d'infrastructures furtifs
- 58 Infrastructures routières intelligentes
- 59 Sécurité active des véhicules
- 60 Architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules
- 61 Sécurité passive des véhicules
- 62 Moteurs à pistons
- 63 Turbomachines
- 64 Acoustique des véhicules
- 65 Architecture électrique des véhicules
- 66 Architecture électronique des véhicules
- 67 Gestion de l'énergie à bord des véhicules
- 68 Liaisons de données véhicule infrastructure
- 69 Systèmes aériens automatisés
- 70 Positionnement et horodatage ultraprécis
- 71 Gestion des flux de véhicules

Des grands enjeux aux technologies clés



Le secteur des transports

Le contexte

La libéralisation des économies stimule le transport des marchandises, et le

développement de la production en flux tendus intègre fortement les services de transport (fret) dans les processus de production. Par ailleurs, les aspirations individuelles conduisent à davantage de déplacements des personnes. Répondant à ces besoins croissants, le domaine des transports connaît depuis plusieurs décennies un développement ininterrompu.

En 2001, l'industrie européenne (UE15) des équipements de transport produisait pour 161 Md€ de valeur ajoutée et employait 2,6 millions de personnes. L'Allemagne (67 Md€ de VA), le Royaume-Uni (28 Md) et la France (26 Md€) sont les pays leaders. Les exportations d'équipement de transport représentaient 18,8 % des exportations industrielles de l'UE et l'excédent com-

Les transports terrestres de marchandises sur le territoire métropolitain (source Oséo-Anvar)
(milliards de tonnes-kilomètres)

	1990	1995	2000	2001	2002
SNCF	49,7	46,6	55,4	50,4	50,0
Routes	193,9	227,1	266,5	273,7	277,2
Voies navigables	7,2	5,9	7,3	6,7	6,9
Oliéoducs	20,5	22,3	21,7	21,2	20,7

Les transports intérieurs de voyageurs (source Oséo-Anvar)
(milliards de voyageurs-kilomètres)

	1990	1995	2000	2001	2002
Voitures particulières	585,6	640,1	699,1	727,6	733,5
Autobus et autocars hors RATP	39,1	39,6	40,4	38,7	37,6
SNCF	63,7	55,6	69,9	71,5	73,5
dont TGV	14,9	21,4	34,7	37,4	39,9
RATP	11,9	10,3	12,7	12,9	13,1
dont ferré	9,7	8,3	10,1	10,3	10,4
dont routier	2,2	2,0	2,6	2,6	2,7
Transports routiers	11,4	12,1	15,1	14,0	13,7

mercial de l'UE 25 dans ce secteur est de 57,5 Md€.

La France dispose historiquement d'une industrie des transports (conception et fabrication des véhicules) de tout premier plan, ainsi que d'opérateurs de services de transports d'envergure internationale.

Automobile

L'Union européenne (UE 25), l'Amérique et l'Asie se partagent, en parts à peu près égales, l'essentiel (98 %) de la production et du marché automobiles mondiaux. Le secteur automobile représente 3 % du PIB de l'Union européenne (UE 15), et 7,5 % de la valeur ajoutée des industries manufacturières. Dix millions de personnes travaillent directement ou indirectement pour l'industrie automobile, soit 7 % de l'emploi du secteur manufacturier européen. Il y a eu 15,9 millions de nouvelles immatriculations en Europe en 2003. Les exportations européennes représentent de l'ordre de 73 Md€ en 2002 et les importations près de 26 Md€.

Bien que les centres de décision restent dans les pays « historiques » des marques, les constructeurs européens ont déplacé une partie des usines d'assemblage en Europe de l'Est : Volkswagen produit la marque Skoda en République tchèque et la marque Audi en Hongrie, Fiat produit en Pologne, Renault en Roumanie... L'assemblage final reste pro-

che des marchés, surtout face à une diversité croissante des produits (les « options » dans l'automobile). En revanche les équipements amont, et a fortiori les composants standards, peuvent être fortement délocalisés. Par exemple, un équipementier dans le domaine du câblage sera amené à délocaliser en Tunisie les faisceaux standards et conservera en Europe les produits plus sophistiqués.

Les constructeurs français cumulent un chiffre d'affaires de 106 Md€ (2003), pour une production proche de 6 millions de véhicules (de l'ordre de 9 % de la production mondiale). Ce secteur représente 300 000 emplois directs en France et 760 000 emplois industriels indirects ; en ajoutant les emplois induits on arrive au chiffre de 2,5 millions d'emplois. L'automobile a représenté 15,3 % des exportations françaises en 2003 ; c'est la branche industrielle qui contribue le plus à la balance commerciale (12 Md€ environ). La R&D du secteur est de 7 Md€, représentant 5 % du chiffre d'affaires des constructeurs, 6 % de celui des équipementiers et de 9 % à 15 % du CA des acteurs clés en France sont :

- les constructeurs : PSA, Renault, Renault Trucks, Irisbus... ;
- les équipementiers : Valéo, Faurecia, Delphi, Siemens, Johnson Controls... ;
- les sociétés de R&D externalisée

(10 % de la R&D automobile).

Le transport routier rassemble, quant à lui, près d'un million d'entreprises (dont beaucoup de petites) dans l'UE 25 et 3,7 millions d'emplois (2001) dont près de 520 000 en France. Il a généré une valeur ajoutée de 120,2 Md€ dans l'UE 25 (2001) dont près de 19 Md€ en France. En France, l'emploi dans le transport routier (fret et passagers) a augmenté de 30 % entre 1990 et 2003 et sa contribution au PIB est restée stable, voire a accusé une légère décroissance, sur cette période.

Ferroviaire

La construction ferroviaire représente en France un chiffre d'affaires proche de 3 Md€ et 17 000 emplois directs (matériel roulant, rail, contrôle commande). 44 % de la production est exportée. L'Europe représente 50 % des débouchés des constructeurs de matériel ferroviaire. Les acteurs clés en France sont Alstom Transport (Île-de-France, Tarbes), Bombardier France (Nord-Pas-de-Calais), Siemens (bureau d'études, ex-Matra Transport) et la SNCF. Pour l'industrie française, les opportunités importantes sont les pays émergents (trains classiques, grande vitesse) et les axes ferroviaires transeuropéens.

Près d'un million de personnes travaillent dans le transport ferroviaire dans l'UE 25 (moitié moins que dans les années 1980), qui représente 197 000

kilomètres de voies ferrées dont 49 % électrifiées. Ces dernières années, le transport de marchandises par rail a diminué au profit de la route (la part du rail est passée de 15,3 % à 8 % entre 1980 et 2001). Le transport de voyageurs par rail a augmenté de 1,1 % par an en moyenne depuis 1990, ce en raison du développement des voies à grande vitesse. La France dispose du second réseau ferré (mesuré en km) derrière l'Allemagne, mais le premier pour les lignes à grande vitesse. C'est le pays où l'emploi lié au service ferroviaire est le plus important, l'accroissement de l'emploi dédié au transport de voyageurs compensant la baisse pour le transport de fret.

Il n'existe pas, dans le monde, de réseau ferroviaire performant à la fois sur le fret et le transport de voyageurs : aux États-Unis, le réseau est performant pour le fret ; l'Allemagne est plus dynamique que la France en matière de fret ferroviaire ; le réseau japonais est performant pour le transport de passagers. Le réseau français n'échappe pas à cette règle. Alors qu'aux États-Unis la vitesse du fret est (en moyenne) de 60 km/h, en France, elle n'est que de 20 km/h (5 km/h s'il y a des frontières à passer) : il faut quatre jours au fret pour traverser la France. L'obstacle n'est pas vraiment technique (il existe une capacité de voies suffisante, bien qu'elles ne soient pas toutes électrifiées), mais organisationnel.

Naval

Les chantiers navals classiques européens ne représentent plus que 6 % des commandes mondiales en 2003. La chute a été extrêmement importante, essentiellement au bénéfice des chantiers asiatiques. Il existe d'ailleurs encore une surcapacité globale en Europe.

Le chiffre d'affaires français du naval « classique » (hors plaisance) fluctue selon les années entre 1 et 2 Md€. Ce secteur exporte une part importante de sa production : environ 50 %, essentiellement vers les États-Unis et l'Italie. Ce secteur emploie 6 600 personnes (2003), dont 4 000 aux chantiers de l'Atlantique (Alstom). En France, on dénombre 15 grands chantiers navals. La réparation représente 2 000 emplois dans quatre à cinq chantiers, et les équipementiers 10 000 emplois. Par ailleurs, la direction des chantiers navals (DCN) représente 12 000 emplois dans le naval militaire.

Concernant la plaisance, domaine d'excellence français (n° 1 mondial en voile, n° 3 en moteur), le chiffre d'affaires français est de 1,2 Md€, en croissance forte et régulière depuis 5 ans. Ce secteur pèse 10 000 emplois, dans 60 entreprises.

Aéronautique et spatial

L'industrie aérospatiale emploie directement en Europe 415 000 personnes, pour la plupart hautement qualifiées, et a généré en 2003 un chiffre d'affaires de 74 Md€, et une valeur ajoutée de 30 Md€ (UE 25), soit 18 % de la valeur ajoutée totale du secteur des équipements de transport. Royaume-Uni, France et Allemagne concentrent 83 % de la valeur ajoutée européenne. Les dépenses de R&D représentent près de 14,5 % du chiffre d'affaires. EADS, leader mondial dans plusieurs de ses métiers, démontre la faisabilité d'une intégration industrielle à l'échelle européenne.

En France, le système du transport aérien génère de l'ordre de 400 000 emplois directs et induits. L'industrie aérospatiale représente près de 101 500 emplois directs, et environ deux fois plus d'emplois indirects et induits. Elle a

réalisé en 2003 un chiffre d'affaires non consolidé de 24,9 Md€. Les dépenses de R&D représentent 17,5 % du chiffre d'affaires, soit près de 4,4 Md€. Les nouvelles commandes enregistrées au cours de 2003 par l'industrie aérospatiale française se chiffrent quant à elles à 40 Md€. La France dispose en ce domaine de champions industriels et technologiques au tout premier rang mondial : partie française d'EADS (Airbus et Eurocopter notamment), Dassault, Thales, Safran (Snecma-Sagem), Ariespace, Onera... Les régions Île-de-France et Sud-Ouest (Midi-Pyrénées et Aquitaine) disposent d'atouts industriels, scientifiques et techniques structurants à l'échelle européenne.

Le transport aérien progresse à un rythme supérieur à 7 % par an depuis 1970 (en kilomètres-passagers), gagnant du terrain sur le train. Sa valeur ajoutée est de 25 Md€ par an, dont un tiers est réalisé par le Royaume-Uni. Le marché, qui a été progressivement déréglementé et privatisé, est encore relativement fragmenté : on observe peu de fusions transfrontalières (à l'exception notable d'Air France-KLM). En revanche, on assiste à une multiplication des alliances transfrontalières, qui ont un effet très structurant (rationalisation des activités, à la fois au niveau industriel et commercial). L'impact est également très positif sur l'utilisation de la flotte, ainsi que sur le développement de « hubs » (plates-formes aéroportuaires de correspondance utilisées comme nœuds de réseau).

Au plan mondial, le groupe Air France-KLM (constitué en mai 2004) est le premier transporteur aérien en termes de recettes et le troisième en termes de passagers-kilomètres transportés (PKT). Avec 48,7 millions de passagers et 126,8 milliards de PKT en 2004, Air France-KLM est le premier transporteur

européen, devant Lufthansa et British Airways. Avec 51,3 millions de passagers en 2004 (+ 6,3 % par rapport à 2003), Paris-CDG est le septième aéroport mondial et le deuxième aéroport européen (derrière Londres-Heathrow) avec un certain potentiel de développement de ses capacités. CDG, avec 526 000 atterrissages et décollages en 2004 est le premier aéroport européen en termes de mouvements. Le système aéroportuaire parisien (CDG et Orly) est le deuxième en Europe (avec 75 millions de passagers en 2004) derrière celui de Londres (Heathrow, Gatwick, Stansted, Luton et London-City). Pour le fret aérien, Paris-CDG, avec 1,64 million de tonnes de fret, est la deuxième plateforme aéroportuaire européenne derrière Frankfort. Le trafic passager des aéroports français est voisin de 130 millions de passagers par an.

Dans le service de transport aérien, les dix dernières années ont vu l'apparition de compagnies à bas coût (*low cost*) pour lesquelles Internet joue un rôle central (9 billets sur 10 pour ces compagnies sont achetés en ligne). Les lignes ferroviaires à grande vitesse peuvent concurrencer, là où elles existent, les services aériens pour des distances inférieures à 1000 km. Le développement de l'intermodalité air-fer est un élément important de la politique des transports en Europe.

La R&D dans le domaine de l'aéronautique est extrêmement importante, majoritairement (en budget) sous forme de développement, bien que l'aéronautique soit à l'origine de ruptures technologiques qui ont diffusé dans d'autres secteurs industriels. Les synergies technologiques intersectorielles sont recherchées.

Les enjeux du secteur des transports

Les enjeux transversaux

Malgré des spécificités propres à chaque mode de transport (terrestre, maritime, aérien), la plupart des enjeux sont transversaux à ces différents modes. En résumé, il s'agit, dans un contexte apparemment durable de prix élevé du pétrole (supérieur à 50 \$ le baril) :

- de réduire drastiquement l'ensemble des externalités environnementales et sociétales (accidents, bruit, pollution locale, congestion de la circulation, consommation de surfaces cultivables, consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre) et/ou d'internaliser les coûts qui en découlent ;
- d'améliorer la qualité du service rendu (temps de parcours, ponctualité, conditions de transport, suivi et traçabilité,...) ;
- de rendre les systèmes de transports résistant aux actes de malveillance et de terrorisme ;
- d'optimiser les coûts.

La réponse à ces enjeux réside dans des innovations tant sur les véhicules et leurs sous-ensembles (ensemble propulsif notamment) que sur l'organisation globale des systèmes de transport. Ces innovations sont attendues sur le plan technique et en termes d'organisation.

Les enjeux spécifiques

Transport routier

Selon le point de vue adopté, les enjeux s'expriment différemment :

- pour l'industrie des véhicules, il s'agit de vendre toujours davantage de véhicules : multimotorisation (plus d'un véhicule par foyer) dans les pays occidentaux au marché saturé, véhicules plus haut de gamme ou à plus fortes marges

(4X4, monospaces...), conquête des marchés présentant un potentiel de croissance (Peco, Chine, Inde, Brésil...) ;

- sachant que le transport routier représente environ un quart des émissions de GES liées aux activités humaines, ces perspectives conduisent les experts à pousser un cri d'alarme : à moins de ruptures (improbables dans les prochaines années) dans les technologies et les usages des véhicules routiers, les externalités sur l'environnement (émissions de GES et de polluants) et sur les populations (accidents de la route, nuisances sonores) continueront de croître.

Ferroviaire « longue distance »

Le transport ferroviaire (passagers et fret) apparaît comme l'un des plus favorables en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Les principaux enjeux sont :

- réduction de la « signature » sonore ;
- intensification de l'utilisation des voies ferrées ;
- interopérabilité européenne (contrôle commande, alimentation électrique, écartement des voies,...) ;
- ouverture à la concurrence du fret ferroviaire, qui contribuera à la nécessaire amélioration du niveau de service (délais, suivi,...), au moins en France ;
- généralisation de la grande vitesse commerciale à 350 km/h.

Transports urbains et périurbains

Avec en moyenne 80 % de population urbaine dans les pays européens, l'enjeu majeur est l'amélioration de la qualité de vie dans les villes, sacrifiée depuis les années soixante dix au « tout-voiture ». Il s'agit de :

- prendre en compte l'évolution de la demande en termes de transports (personnes, marchandises), conséquence notamment du vieillissement de la population ;
- permettre la coexistence du transport de passagers et de marchandises (le

plus souvent, en ville, des colis de petite taille) ;

- décongestionner les axes de transport.

Naval

Contrairement aux navires « standards » (cargos, porte-conteneurs, pétroliers,...), les navires dits à haute valeur ajoutée sont toujours produits en France, qui sait fabriquer des navires à l'unité et dispose d'un tissu de fournisseurs et de sous-traitants adapté. Les enjeux pour la construction navale française (y compris la plaisance) sont :

- l'augmentation de la valeur ajoutée et l'innovation ;
- la prise en compte des aspects environnementaux : le « paquebot zéro rejet » devient une réalité, les mêmes normes pourraient être élargies aux bateaux plus petits (grande plaisance dans un premier temps) ;
- le recyclage des bateaux de plaisance (une réglementation européenne s'ébauche).

Aéronautique et espace

Les enjeux « transversaux » indiqués ci-dessus s'appliquent naturellement au transport aérien (la part de l'aviation dans les activités humaines générant des gaz à effet de serre dans le monde est estimée à 3 % mais le secteur du transport aérien est tendanciellement en forte croissance, de l'ordre de 5 % par an). Deux enjeux spécifiques apparaissent :

- l'optimisation de l'utilisation de l'espace aérien, qui passe par la modification profonde du contrôle aérien (organisation du ciel unique européen, procédures, trajectoires,...) ;
- le raccourcissement du temps nécessaire aux formalités administratives et de sécurité (en conservant les mêmes exigences de sécurité).

Dans le domaine spatial, l'accès autonome à l'espace reste un enjeu stratégi-

que pour l'Europe et pour la France en particulier. Le contexte international (notamment l'arrivée de systèmes de lancement russes sur le marché commercial du transport spatial) a conduit l'Europe à réorganiser le secteur autour d'un pôle industriel unifié dont l'objectif est de dégager des économies d'échelle. Pour assurer son avenir, le secteur du transport spatial européen doit conserver son haut niveau de fiabilité et continuer à maîtriser l'équilibre entre la rigueur financière et le maintien des compétences. Forte de l'exemple de nos concurrents américains, l'Europe doit consolider son projet à moyen et long termes pour fédérer les énergies et les moyens au travers de perspectives claires d'exploitation et de développement.

Les tendances d'évolution du secteur des transports

L'intermodalité et la fin du « tout-routier »

Une réflexion globale permet d'édicter quelques principes directeurs visant à faire baisser les impacts négatifs des transports, tout en satisfaisant les besoins d'échanges de biens et de mobilité des personnes :

- à prestation finale égale, diminuer le besoin de transport (exemple : le courrier électronique se substituant au courrier traditionnel, le télétravail ne nécessitant pas pour tous un déplacement quotidien,...) ;
- à demande de transport donnée, favoriser la massification des flux de deux manières :
 - avoir moins recours aux flux tendus dans le fret, donc diminuer les fréquences de livraison et stocker davantage (ce qui se fait naturellement pour les biens à faible valeur ajoutée tels que les

matières premières) ;

- massifier un ensemble de flux empruntant un même axe et un même vecteur à haut débit (grosse capacité x grande vitesse) selon le principe des « hubs » : le transport de faible ou moyenne capacité reste dans ce schéma réservé aux liaisons terminales (origine vers hub, hub vers destination). À côté de ces schémas, des opérateurs de transport exploitant des trajets directs sans passer par un hub peuvent occuper certains segments de marché : fret urgent, voyageurs pressés prêts à payer davantage...

Ces principes directeurs conduisent à encourager la fin du « tout-routier », en engageant une réflexion globale sur l'intermodalité, tant pour les transports longue distance que pour les transports urbains et périurbains.

Les transports longue distance

D'ores et déjà, un tiers des échanges commerciaux européens se font par voie maritime et les premiers projets d'autoroutes maritimes sont mis en œuvre. Dans l'Union européenne, la majorité de la population se trouve à moins de 200 km des côtes et ce tropisme se renforce. Le transport maritime (ou fluvial) est un mode très favorable en termes de consommation d'énergie, et son attractivité se renforcera avec l'augmentation du prix du pétrole.

Le transport ferroviaire ne pourra regagner des parts de marché que s'il sait s'adapter à la demande (lots de moindre volume) et surtout s'il adopte des innovations (technologiques, organisationnelles) permettant d'accroître son efficacité, et donc son attractivité, à travers :

- la limitation de l'impact des ruptures de charges liées au transbordement au départ et à l'arrivée du tronçon ferroviaire ;

- une bourse de sillons pour l'optimisation de l'utilisation des infrastructures ferroviaires ;

- l'usage complémentaire des voies traditionnelles : utilisation des lignes TGV de nuit pour acheminer le fret ferroviaire, voire construction de TGV mixtes fret-passagers (comme certains avions) ;

- à plus long terme, le changement de l'usage des gares pour en faire des stations de préassemblage, afin de limiter les ruptures de charges et d'éviter les transports routiers usine-gare.

Dans ce schéma, le transport routier, dont la flexibilité est le principal atout, est réservé aux liaisons terminales.

Les transports urbains

Afin de sortir les centre ville du « tout-voiture » et de décongestionner les accès aux grandes métropoles, l'amélioration des services de transports urbains ou périurbains collectifs ou semi-collectifs est un enjeu majeur. La demande de transport requiert un service porte-à-porte qui, pour les passagers en particulier, n'est pas toujours intégré de façon optimale entre les différents modes. Le développement de parkings à la périphérie des villes, permettant de stationner près d'une gare pour venir en ville par les transports en commun, va dans ce sens.

Il y a par ailleurs une demande croissante (notamment du fait du vieillissement de la population) pour des transports de proximité à faible flux, du transport point à point ; or il n'existe pas de véhicules de moins de neuf places dans les transports publics. On va vers un transport individuel public, des véhicules mis à la disposition des clients avec éventuellement une assistance au conducteur, limités à une zone géographique. De nouveaux acteurs vont probablement se positionner sur ce sec-

teur, même s'il existe encore une incertitude sur le modèle économique de ces services.

Deux secteurs connexes à prendre en compte

Le tourisme

Le métier des agences de voyage se transforme très rapidement, en particulier du fait de l'impact du commerce électronique (émergence des agences virtuelles en ligne), mais aussi du plafonnement des commissions accordées par les compagnies aériennes (95 % de leur chiffre d'affaires). L'intégration des offres de voyages va se poursuivre, notamment avec la croissance du *dynamic packaging* qui permet à l'internaute de composer à sa guise son voyage avec transport aérien, hébergement, location de voitures, etc.

L'attractivité du parc hôtelier français, et en particulier parisien, passe certainement par l'amélioration du rapport qualité-prix comparé à celui d'autres destinations touristiques européennes, a fortiori dans un contexte d'euro fort vis-à-vis du dollar US. Elle pourrait passer également en partie par la mise en œuvre de la « haute qualité environnementale ».

Les services associés aux transports

Une tendance lourde, déjà largement perceptible, est le développement des services associés aux transports, qu'il s'agisse d'informations sur le trafic, d'aide au voyage (hotels, points d'intérêt, commerces...), d'informations multimodales pour les voyageurs, de la possibilité de connaître quasiment en temps réel l'état d'avancement d'une livraison, etc. Des sociétés de logistique qui associent transports aérien, ferroviaire et routier (sur le modèle de FedEx) proposent, déjà, un service tout intégré. À plus long terme, certains experts pré-

disent l'essor de la location automobile, qui permettrait de répondre aux besoins changeants des ménages (une petite voiture quand on va travailler, une grosse pour partir en vacances avec toute la famille...). Le modèle économique associé reste toutefois à préciser. Notons, enfin, que la multiplication des organes électroniques conduit à une modification profonde des métiers liés à l'entretien des véhicules. Ces acteurs, souvent des entreprises artisanales, se trouveront rapidement confrontés à des problèmes de compétences et d'importants besoins en formation.

Les tendances technologiques du secteur

Face aux enjeux et pour répondre aux évolutions des usages, les tendances technologiques dessinent un « tronc commun » aux différents modes de transport, complété par des tendances plus spécifiques à chaque mode de transport. On n'anticipe pas de rupture technologique majeure à l'horizon 2010.

La motorisation et les combustibles

Pour les moteurs thermiques des véhicules (moteurs à pistons, turbomachines), l'utilisation de combustibles fossiles classiques restera prépondérante dans la prochaine décennie ; toutefois :

- les cycles thermodynamiques présentent un potentiel d'optimisation exploitable grâce notamment à l'utilisation de nouveaux matériaux, de nouvelles architectures (échangeurs...) ou à l'apport de systèmes avancés de régulation ;
- la combustion peut encore être améliorée ;
- la conversion de l'énergie jusqu'à présent perdue sous forme de chaleur est indispensable (énergie de freinage, per-

tes thermiques du moteurs...);

- les combustibles à base d'hydrocarbures seront complétés par des carburants de synthèse ou issus de la biomasse ;
- l'hybridation de la propulsion couplant un moteur thermique et un moteur électrique commence à être produite en série (Toyota, bientôt PSA), et cette technologie est amenée à se développer.

La pile à combustible ne peut être envisagée que comme une solution à long terme, nécessitant une réflexion sur le cycle énergétique global du combustible (hydrogène, hydrocarbure) « du puits à la roue » et les capacités d'approvisionnement à grande échelle des catalyseurs (platine aujourd'hui) et du combustible (hydrogène). Quoi qu'il en soit, la pile à combustible ne possède pas une densité énergétique suffisante pour assurer la motorisation principale des avions ; elle est en revanche envisageable pour les groupes auxiliaires de puissance, nécessaires pour l'alimentation en énergie des équipements de bord.

Les nouveaux matériaux et les architectures des véhicules

Outre l'amélioration des moteurs, l'allègement des véhicules contribue à une meilleure performance énergétique. L'incorporation de matériaux nouveaux (métalliques, plastiques, composites, ...) et l'agencement de ces matériaux dans des architectures innovantes de véhicules permettent cet allègement. Dans le ferroviaire, en particulier, des innovations semblent possibles sur le matériel roulant : tracteurs, wagons (la conception des wagons de fret a environ 50 ans), trains sécables (testés en Allemagne).

La réduction du bruit

La réduction du bruit sera quant à elle obtenue grâce à :

- la réduction passive : en travaillant sur la motorisation (vibrations, instabilités,...), la configuration des véhicules (« masquage » des sources de bruit comme le moteur, aérodynamique,...), et (pour les transports terrestres), l'interaction roue-route ou roue-rail ;
- la réduction active : en transmettant un bruit en opposition de phase au bruit qu'on n'aura pas pu réduire à la source (les deux bruits s'annulent, la résultante étant le silence).

L'électricité et l'électronique

L'allègement des véhicules passe également par une optimisation des réseaux d'énergie à bord : des actuateurs électriques remplacent les fonctions hydrauliques à bord des avions (et donc un réseau électrique, plus léger, remplace le réseau hydraulique) ; le multiplexage ou (à plus long terme) l'utilisation des courants porteurs permet de réduire la masse de câbles à bord des voitures ; la récupération de l'énergie de freinage, qui devrait se généraliser, nécessite une électronique de puissance adaptée.

Les fonctions électroniques représenteront une proportion croissante du prix d'un véhicule : aides à la navigation (tous véhicules), systèmes d'anticollision (aéronautique, diffusion en cours vers l'automobile), aide au contrôle des trajectoires (véhicules routiers : ABS, ESP, régulateurs de vitesse...). Il devient donc indispensable de doter les véhicules de véritables systèmes d'exploitation. L'objet du consortium Autosar (*Automotive Open System Architecture*) est de développer un standard adopté par ses membres.

D'autres innovations sont rendues possibles à court ou moyen terme par les progrès en matière de TIC : tarification à l'utilisation (*pay per use*), limitation automatique de vitesse (systèmes de bord

de route, radar, GPS,...), aides à la conduite élaborées, taxation des véhicules selon leur consommation de carburant...

Les infrastructures de transport

Sur le plan « mécanique », l'incorporation de déchets ou de matériaux recyclés dans les routes ou les ballasts de voies ferrées constitue une tendance lourde. En outre, les méthodes de construction ou de rénovation d'infrastructures évoluent vers une plus grande « furtivité », c'est-à-dire une moindre gêne pour les populations ou les usagers lors des travaux.

Par ailleurs, lorsqu'il est question de transports « intelligents », une partie de cette intelligence réside dans les infrastructures de transport :

- intégration de fonctions dans les routes, permettant d'informer les véhicules de difficultés (prévention des accidents) ou de congestions du trafic ;
- de nouvelles technologies de signalisation et de régulation des trains (nouveaux systèmes TVM et ERTMS niveaux 1-2-3) permettront de diminuer l'espacement de sécurité des trains, et donc d'augmenter la capacité du réseau ;
- améliorations de l'organisation, des procédures et des outils pour le contrôle aérien.

L'intermodalité peut également être renforcée par le recours à des calculateurs d'itinéraire multimodal, qui déterminent la combinaison optimale entre différents types de transports (y compris le vélo, la marche...).

L'Europe bénéficie d'un domaine d'excellence avec Galileo, qui permettra d'offrir des services de positionnement avec une précision de 1 m contre 10 m pour le GPS américain civil. La mise en œuvre opérationnelle de Galileo est prévue pour 2007-2008. Le service de posi-

tionnement sera sans doute gratuit lui aussi, mais d'autres services à plus haute valeur ajoutée seront payants.

La place de l'homme dans les systèmes de transport intelligents (ITS)

À l'horizon 2010, le rôle croissant dans les transports des TIC et des systèmes d'aide au pilotage ne devrait pas bouleverser profondément les systèmes de transports : tout au plus y aura-t-il à cet horizon quelques lignes de métro automatiques supplémentaires en service dans le monde (y compris des lignes anciennes qui auront été automatisées). Le schéma cible est-il, à terme, de sortir complètement l'opérateur du véhicule ? Les experts sont partagés sur cette question, même s'ils s'accordent sur l'automatisation sans cesse plus poussée des transports, qui, seule, permettra des gains significatifs en termes de réduction des accidents et de gestion des flux de véhicules.

La configuration « sans pilote » est déjà mise en œuvre avec succès dans le transport urbain guidé (métro « Météor », Val,...). Sur les lignes de métro « classiques », seul l'usage des automatismes permet de garantir un espacement de 90 secondes entre rames aux heures de pointe. La France possède une avance

par rapport aux autres pays européens dans ce domaine. La RATP s'est engagée dans un projet d'automatisation totale de la ligne 1 du métro sans interruption de trafic. Si elle y parvient, le marché de la rénovation des vieux métros des capitales étrangères s'ouvre à la France. Le transport ferroviaire longue distance semble quant à lui réticent à l'absence de conducteur à bord, plus pour des questions d'acceptabilité que techniques.

La conduite routière automatique fait aujourd'hui l'objet d'études au niveau de la recherche académique. Le déploiement à grande échelle de flottes de voitures ou de camions automatiques nécessite néanmoins de nombreuses études et des développements complémentaires, pour lesquels les constructeurs ne semblent pas tous motivés (le discours ambiant proclame plutôt que la conduite sur route procure du plaisir au conducteur). La contribution des infrastructures doit également être prise en compte et pensée au niveau européen par les pouvoirs publics, en particulier pour assurer la standardisation et l'interopérabilité. Le Japon s'est doté d'une véritable vision stratégique et technologique dans ce domaine, et d'un pilotage idoine de cette initiative au plus haut niveau.

Bien que l'essentiel des phases de vol soient automatisées, il semble difficile, dans le domaine du transport aérien civil, de sortir complètement à moyen terme l'opérateur humain de la « boucle ». La tendance est davantage à développer de nouveaux outils intelligents afin d'assister et de simplifier le travail des opérateurs et d'en automatiser certaines fonctions. L'avion sans pilote, techniquement possible, ne paraît pas socialement acceptable dans l'immédiat pour le transport de voyageurs.

Enfin, la technologie est à même d'apporter des solutions dans le transport des petites charges utiles. La question clé est en effet : est-il pertinent, notamment sur le plan énergétique, pour transporter une charge utile de quelques kilos au plus (lettre, colis, caméra, capteur...) de mobiliser un véhicule dimensionné pour transporter son conducteur (quelques dizaines de kilos), le véhicule pesant quelques centaines de kilos ? Des systèmes robotisés légers (de surface, ou aériens) transportant uniquement la charge utile pourraient être la réponse. Les transferts de technologie du militaire vers le civil ouvrent un vaste champ d'applications possibles des engins sans pilote.

Transport



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

56. Architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre

Description

Composantes essentielles des systèmes de transport, les infrastructures de transport terrestre (transport routier, transport guidé) doivent s'adapter à de nombreuses exigences ou contraintes parfois contradictoires :

- durabilité des infrastructures, en conditions « normales » (trafic, météorologie) ou vis-à-vis de risques naturels (mouvements de terrain, risque sismique ou hydrologique) ;
- réduction des impacts environnementaux : bruit, pollution des eaux de ruissellement, déchets ;
- amélioration de la sécurité (routière en particulier), par une meilleure adhérence et/ou lisibilité de l'infrastructure ;
- réduction du coût global de possession des infrastructures (investissement + entretien). Cette technologie nécessite une approche pluridisciplinaire au niveau de :
 - l'architecture globale : il incombe au maître d'œuvre, au moment de la conception puis de la réalisation de l'infrastructure, d'assembler et d'intégrer les différents matériaux et techniques à sa disposition pour répondre aux besoins exprimés et aux contraintes (trafic, conditions climatiques, adhérence, lisibilité, intégration dans le paysage ou la ville...) ;
 - des matériaux :

– selon la finalité de l'infrastructure et son environnement géotechnique, un vaste choix de matériaux est possible pour chaque partie de l'infrastructure. Une route, par exemple, comporte typiquement, à partir du sol terrassé, quatre couches qui doivent posséder des caractéristiques différentes : couches de forme, de fondation, de base, de roulement. La couche de roulement, en particulier, doit procurer au véhicule et au conducteur les caractéristiques voulues d'adhérence (longitudinale et latérale) et de

lisibilité (y compris en conditions météorologiques dégradées). Dans le cas d'un ouvrage d'art (pont, tunnel), la complexité est considérablement augmentée ;

– les matériaux sont typiquement : matériaux granulaires, matériaux poreux, bétons, bétons bitumineux, enrobés, liants, renforts métalliques ou fibreux, signalisation horizontale (peintures routières...). La maîtrise de la formulation et l'élaboration (malaxage...) de ces matériaux est également indispensable pour garantir les propriétés voulues avec une bonne reproductibilité ;

• l'anticipation : le suivi et la gestion de l'endommagement s'appuient sur une connaissance fine des mécanismes d'endommagement permettant de guider la conception en amont, des outils de diagnostic, la formulation et la mise en œuvre de matériaux de réparation des fissures, des méthodes de gestion de l'infrastructure (et les systèmes d'information associés).

Enfin, ces technologies doivent prendre en compte le rôle grandissant des technologies d'infrastructures routières intelligentes. Cette tendance devrait notamment conduire à inclure un nombre grandissant de capteurs ou de composants électroniques dans ou sur la chaussée.

Enjeux, Impact

Les innovations technologiques répondent à un enjeu économique : le seul réseau routier national français représente un patrimoine estimé à plus de 183 Md€. La compétitivité à l'export des 1 500 entreprises françaises du secteur est également en jeu. Par ailleurs les impacts des infrastructures sur la compétitivité des territoires sont reconnus.

Impliquer davantage la dimension « infrastructures » dans la réflexion peut égale-

ment contribuer significativement à combattre l'insécurité routière.

Enfin, l'impact environnemental ne doit pas être négligé, en prenant en compte :

- la valorisation de certains déchets par incorporation dans l'infrastructure (mâche-fers, résidus de pneumatiques...);
- la meilleure intégration dans l'environnement (nuisances sonores, visuelles, eaux de ruissellement).

Marché

En 2003, le marché des travaux publics consacrés aux transports terrestres a atteint près de 20 Md€ en France (près de 163 000 salariés), dont plus de la moitié pour des travaux routiers. Plus de la moitié de l'activité (en valeur) est consacrée à des travaux neufs, le reste correspondant à des travaux d'amélioration et d'entretien. Deux types de marchés sont concernés par cette technologie : les transports terrestres « longue distance » (entre métropoles), et les transports urbains.

En Europe, les réseaux sont globalement denses, et le marché sera tiré par la réalisation de lignes ferrées à grande vitesse, et la construction ou la rénovation de routes et d'autoroutes. Quelques ouvrages d'art de grande envergure sont également attendus (avec la liaison ferroviaire Lyon - Turin). En revanche, le développement de pays émergents (Peco, Chine, Inde, Brésil...) entraîne l'explosion des besoins d'infrastructures (ex : ligne ferroviaire à haute vitesse Pékin - Shanghai).

La croissance de la demande de transports dans les zones urbaines exige d'importants travaux (élargissement, voies dédiées ...) ou la création de nouvelles infrastructures de transports en commun. La densité et la sensibilité des sols et des sous-sols, l'existence de multiples réseaux (eau, assainissement, énergies, communications...) rendent indispensable une approche spécifiquement urbaine et des compétences spécifiques.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, matériaux, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), mécanique, génie des matériaux, génie civil, géographie et aménagement.

■ Compétences technologiques : matériaux - métallurgie, procédés techniques, environnement-pollution, transports, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Vestapolis (Île-de-France), Génie civil ouest (Pays de la Loire), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), Ville et mobilité (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : textiles techniques et fonctionnels ; travaux d'infrastructuresfurtifs ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; sécurité passive des véhicules ; acoustique des véhicules ; modélisation, simulation, calcul.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : ENTPE, Inrets, LCPC, Réseau scientifique et technique de l'équipement (CETEs, LRPCs), RFF.

Industriels : Amec Spie Rail, Appia, Colas, Eiffage, Eurovia, Freyssinet, GTM.

Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre de grands programmes de recherche incitative Predit [Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - (www.predit.prd.fr)] et RGCU [Réseau de recherche technologique génie civil et urbain (www.rgcu.prd.fr)].

Pour en savoir plus : www.piarc.org ; www.fehrl.org ; www.equipement.gouv.fr ; www.usirf.com ; www.lcpc.fr ; www.fntp.fr

Commentaires

Il existe une véritable « école française des routes », qui permet à la France d'avoir quelques « champions » nationaux, facteurs clés de succès dans la compétition internationale.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Travaux publics, services de transports

Transport



57. Travaux d'infrastructures furtifs

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Dans l'état de l'art actuel (2005), la construction d'une infrastructure de transport (routier, ferroviaire) nécessite souvent plusieurs années de travaux. La gêne occasionnée par les travaux est généralement élevée, d'autant plus s'il s'agit de compléter une infrastructure existante (tramway, élargissement d'une autoroute). Les technologies pour des travaux d'infrastructures de transport plus « furtifs », c'est-à-dire engendrant le moins de gêne et d'interruption de service possibles, peuvent se décliner de la manière suivante :

- planification et ordonnancement des différents acteurs devant intervenir sur un chantier afin d'éviter, dans la mesure du possible, les « temps morts » ;
- préparation et traitement des sols (stabilisation, étanchéité...) ;
- choix des matériaux présentant à la fois les caractéristiques voulues et une bonne facilité de mise en œuvre ;
- utilisation de robots autonomes ou téléopérés (tunneliers, engins de terrassement...) ;
- utilisation des TIC (gestion du chantier) et des technologies de positionnement.

Pour le cas particulier des transports urbains, la réduction des nuisances et de l'encombrement en surface (installations, circulation d'engins, interruption des voies de circulation, poussière, bruit...) sont, plus qu'ailleurs, des critères importants. Les principales évolutions techniques concernent la réalisation de parois moulées en continu sans encombrement en surface (les machines sont sous terre), la mise en œuvre de méthodes d'excavation en continu (rabet de mine, chaîne à pics, haveuse...), de stabilisation du front de taille et de marinage (évacuation des déblais).

Ces technologies, qui comportent de nombreuses dimensions organisationnelles, trouvent également un vaste champ d'application dans la construction ou la remise à niveau des infrastructures ferrées. Ainsi, la RATP a engagé l'automatisation de la ligne 1 du métro parisien sans interruption de trafic (mise en service : 2010).

Enjeux, Impact

Permettre à la France de se doter ou de renouveler ses infrastructures de transport, sans perturber localement l'économie ni mécontenter les riverains, est un élément d'attractivité du territoire.

En outre, la France dispose d'entreprises de travaux publics et d'ingénierie que la maîtrise de ces technologies mettrait en situation favorable dans les appels d'offre internationaux.

Marché

Toutes les activités qui composent les travaux publics sont potentiellement concernées, notamment :

- les travaux souterrains et les travaux routiers ;
- les voies ferrées ;
- l'adduction d'eau, l'assainissement et les autres canalisations ;
- les travaux électriques.

Selon la Fédération nationale des travaux publics (www.fntp.fr), le secteur représente, en France, 8 000 entreprises, 260 000 salariés et un chiffre d'affaires de 32 Md€ en France et 15 Md€ à l'exportation.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), génie des procédés, mécani-

que, génie des matériaux, génie civil, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, psychologie, sociologie, géographie et aménagement.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, analyse, mesure et contrôle, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail matériaux, environnement - pollution, machines outils, transports, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Génie civil ouest (Pays de la Loire), Ville et mobilité (Île-de-France).

■ Liens avec (technologies) : ingénierie des systèmes complexes ; positionnement et horodatage ultraprécis ; modélisation, simulation, calcul ; architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre ; infra-

structures routières intelligentes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CGES (ENSM Paris), ENPC, Inrets, LCPC.

Industriels : Colas, Egis, Eiffage, RATP, Soldata, Solétanche Bachy, Vinci...

Commentaires

Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre de grands programmes de recherche incitative tels que le Predit [Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (www.predit.prd.fr)] et le RGCU [Réseau de recherche technologique génie civil et urbain (www.rgcu.prd.fr)].

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Transport



58. Infrastructures routières intelligentes

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Dès à présent, la télématique routière équipe un nombre croissant de grands axes (autoroutes, abords des grandes agglomérations...). Elle apporte une information aux conducteurs et aux opérateurs sur les conditions de circulation (bouchons, météo, événements...). Dans les prochaines années, cette tendance à équiper les routes d'équipements « intelligents » se poursuivra. Les fonctionnalités suivantes sont notamment attendues :

- information des conducteurs. De nombreux accidents sont dus à un comportement des conducteurs inadapté aux difficultés de la route. Les infrastructures routières intelligentes seront équipées de systèmes d'information (capteurs, chaînes de traitement, panneaux à messages variables...) signalant aux conducteurs l'imminence d'une difficulté : rupture physique de l'itinéraire (dévers inattendu, nid-de-poule...), conditions dégradées (eau sur la chaussée, vent...), mauvaise visibilité ou lisibilité de la route (brouillard, éblouissement, contraste...);
- guidage des véhicules. Cette fonctionnalité est un premier pas vers la conduite automatisée, qui nécessite un guidage latéral (garder le véhicule sur la chaussée) et longitudinal (adapter la vitesse aux conditions d'adhérence et de trafic). À titre d'illustration, des ferrites équipent déjà certaines routes de montagne, permettant aux chasse-neige équipés de suivre le tracé de la route, même quand elle est recouverte de neige. Dans un autre cas, des peintures spéciales sont appliquées sur la chaussée, représentant un code à barre, et sont lues par un capteur installé à bord du véhicule. Ce code peut contenir diverses informations, comme la vitesse recommandée.

À terme, les informations générées par les dispositifs décrits ci-dessus peuvent être intégrées dans une boucle de contrôle-commande qui intervient sur les aides à la conduite (ESP, freinage...), voire sur le pilotage global du véhicule. Ces dispositifs peuvent également être couplés avec des systèmes de positionnement satellitaires (*Positionnement et horodatage ultraprécis*). Il apparaît clairement que cette technologie est complémentaire de la *Sécurité active des véhicules*. Dans un premier temps, les deux technologies peuvent se développer parallèlement, les informations ou les aides à la conduite générées par l'infrastructure étant interprétées par le conducteur. À terme, une coopération entre le véhicule et l'infrastructure est incontournable, d'où des problématiques de standardisation des interfaces associées.

Le principal verrou est le coût du déploiement à grande échelle de tels dispositifs sur l'ensemble du réseau routier : la France compte, en effet, près d'un million de km de routes secondaires, les plus accidentogènes, qu'il conviendrait d'équiper en priorité.

Enjeux, Impact

On estime à un million par an le nombre de morts dans les transports dans le monde (5 000 en France), principalement dans les transports routiers (y compris les piétons). Les blessés se comptent en millions. Les infrastructures routières intelligentes permettent de répondre à cet enjeu de société majeur.

L'impact pour l'économie française de ces technologies est double :

- réduction de l'insécurité routière, en France et en Europe dans un premier temps ;
- renforcement de la compétitivité des

industriels maîtrisant ces technologies, les mettant en position de conquérir des marchés à l'export (tout d'abord dans les pays développés).

Marché

Les applications des systèmes de transports intelligents sont nombreuses, à la fois pour le transport des personnes et des marchandises. Parmi les applications possibles, on distingue :

- l'information des voyageurs ;
- la gestion de la circulation ;
- la gestion du transport de marchandises et des flottes commerciales ;
- la gestion des transports publics ;
- la sécurité dans les transports ;
- la gestion des situations d'urgence.

Le marché est en très forte croissance. On estime, par exemple, qu'aux États-Unis le marché devrait passer de 6 Md\$, en 2002, à 36 Md\$, en 2010.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : optique, génie civil, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, psychologie, sociologie, droit et sciences politiques, économie et gestion, géographie et aménagement.

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

■ Pôles de compétitivité : Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Génie civil ouest (Pays de la Loire), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Ville et mobilité (Île-de-France), Logistique Seine Normandie (Haute-Normandie), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes). Cette technologie clé, qui fait appel à de nombreuses briques technologiques, présente de ce fait un potentiel d'interaction avec de nombreux pôles de compétitivité (11).

■ Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour infrastructures de transport

terrestre ; travaux d'infrastructures furtifs ; sécurité active des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; capteurs intelligents et traitement du signal ; assemblage multimatériaux ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Les principaux acteurs français du secteur sont regroupés au sein de l'association ITS France (www.itsfrance.net). Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit [Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres-www.predit.prd.fr].

Parmi les acteurs dans le domaine des infrastructures, on peut citer :

Centres de compétences : Certu, Cetes (Lyon et Méditerranée), Inrets, LCPC, Setra. Industriels : sociétés d'autoroutes (APRR, ASF, Cofiroute, Sanef), Amec Spie, Ceryx Traffic System, Citilog, Colas, C-S Systèmes d'information, DTnalogic, Eurovia, Ifotec, Keolis, Lacroix (Groupe), Lumiplan, Neavia, RATP, Safran, SES Signalisation, Setec ITS, Soridis, Sterai, Thales, Traficon France...

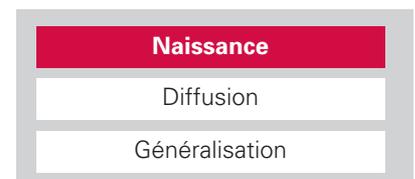
Le Ser (Syndicat des équipements de la route - www.ser-info.com) rassemble des entreprises actives dans le domaine des infrastructures routières intelligentes.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : au niveau continental, trois organisations se chargent de la promotion des systèmes (dont les infrastructures) de transports intelligents : Ertico (*Intelligent Transport Systems & Services*) en Europe (www.ertico.com et www.itsnetwork.org) ; ITS America aux États-Unis ; ITS Japan au Japon.

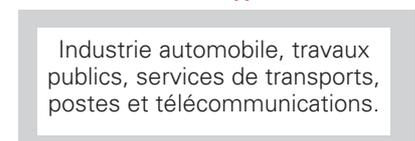
Commentaires

La généralisation des infrastructures routières intelligentes ne fait de sens que si elle est « pilotée » au niveau européen, en particulier pour assurer la standardisation et l'interopérabilité. On notera que le Japon s'est doté d'une véritable vision stratégique et technologique dans ce domaine et d'un pilotage de cette initiative au plus haut niveau de l'État.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Transport



Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

59. Sécurité active des véhicules

Description

La sécurité active englobe l'ensemble des dispositifs permettant de prévenir les accidents (chocs, perte d'adhérence, décrochage...) par une action préventive (information du pilote-conducteur) et/ou dynamique (le dispositif « prend la main » dans le pilotage du véhicule). Schématiquement, ces dispositifs incluent un ensemble de capteurs (rotation des roues, glissement, accélération, proximité d'autres véhicules ou d'obstacles...), une chaîne de traitement des signaux émis par ces capteurs (circuit électronique, Asic, ordinateur de bord...), et un actionneur qui se substitue plus ou moins au pilote en prenant des actions correctives ou en générant une alerte (accélération, relâchement du freinage, braquage de roues ou de gouvernes...).

À titre d'illustration, les systèmes ABS (anti-blocage des freins), BAS (assistance au freinage), ESP (correction de trajectoire) et anti-patinage, équipent de plus en plus souvent les véhicules routiers en série. Les avions commerciaux sont équipés de nombreux dispositifs qui assistent le pilote : GPWS (avertisseur de proximité du sol), anticollision TCAS (*Traffic Alert & Collision Avoidance System*), nouveaux concepts de pilotage en trajectoire...

Pour les véhicules routiers, de nouveaux dispositifs sont attendus, capables d'assurer des fonctions telles que prévenir les sorties de voies, éviter les chocs sur obstacles fixes ou mobiles, gérer les interdistances entre véhicules, limiter la vitesse du véhicule à la vitesse autorisée... À plus long terme, en associant ces technologies aux infrastructures routières intelligentes et au positionnement et horodatage ultraprécis, les aides à la conduite changeront profondément le rôle du conducteur.

Concernant les aéronefs, le niveau d'automatisation est déjà tel qu'on peut envisager des vols 100 % automatiques.

Si les progrès en matière d'électronique ouvrent un vaste champ pour le développement de nouveaux dispositifs, plusieurs verrous limitent la diffusion de ces technologies, principalement dans le segment automobile :

- l'augmentation du coût d'achat que les consommateurs ne sont pas tous prêts à supporter ;
- les problèmes de fiabilité (résolus dans l'aéronautique, moyennant des procédures formelles de développement et de certification) ;
- l'évolution du rôle du conducteur, notamment le conducteur non professionnel (automobile), et non formé à ces nouveaux dispositifs.

Enjeux, Impact

On estime à un million par an le nombre de morts dans les transports dans le monde (5 000 en France), principalement dans les transports routiers (y compris les piétons). Les blessés se comptent en millions. Les technologies de sécurité active des véhicules permettent de répondre à cet enjeu de société majeur.

L'impact de ces technologies est double :

- réduction du nombre de morts et de blessés dans les transports ;
- renforcement de la compétitivité des industriels maîtrisant ces technologies (potentiel export).

Marché

Les marchés concernés couvrent tous les modes de transports. Le secteur aéronautique est déjà largement utilisateur de technologies de sécurité active.

Ces technologies sont en fort développement dans le domaine automobile. Sur ce secteur, le marché pourrait ainsi passer de 2,7 Md€ en 2003 à 3,6 Md€ en 2010, en Europe. À cette même date, le marché de la sécurité active dans l'automobile pourrait représenter 4,54 Md\$ en Amérique du Nord. En fonction des technologies, les taux de pénétration sont très différents. Ainsi, l'ABS devrait équiper pratiquement 100 % des nouveaux véhicules dès 2006, alors que les systèmes d'aides à la conduite avancés restent destinés à des segments haut de gamme et continuent de connaître des développements technologiques.

Acteurs

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

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

■ Pôles de compétitivité : Vestapolis (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), System@tic (Île-de-France), Photonique (Provence-Alpes-Côte-d'Azur), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Mobilité

et transports avancés (Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité passive des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; capteurs intelligents et traitement du signal ; ingénierie des systèmes complexes

■ Principaux acteurs français

Dans les domaines automobile et ferroviaire, les travaux de recherche en matière de sécurité (dont sécurité active) sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres-www.predit.prd.fr).

Centres de compétences : CEA, CNRS IRC-CyN (Nantes), CNRS LAAS (Toulouse), Inria, Inrets, Onera...

Industriels: Alstom, EADS-Airbus, Faurecia, PSA Peugeot Citroën, Renault, Safran, Thales, Valéo...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs et équipementiers automobiles travaillent sur la sécurité active des véhicules. Les constructeurs et équipementiers de l'aéronautique et du ferroviaire sont également concernés.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Transport



Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

60. Architecture et matériaux pour l'allégement des véhicules

Description

L'allégement des véhicules est une composante essentielle de l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de transport, avec l'optimisation des moteurs, des trajectoires et des flux de véhicules.

Cet allégement sera obtenu en adoptant une approche structurée selon trois axes principaux :

- nouveaux matériaux : l'aluminium, les alliages d'aluminium ou de magnésium, le titane, les matériaux composites et autres polymères représentent des matériaux de choix du point de vue de l'allégement. En réaction, les aciers ont connu des avancées importantes. Celles-ci concernent d'une part leur utilisation sous forme de mousses ou de matériaux sandwich, et d'autre part la mise au point de nouvelles nuances à très haute résistance ;
- méthodes de conception innovantes : les outils de CAO et de simulation permettent de dimensionner les structures au plus juste, sans engager de coûts rédhibitoires. Ces techniques permettent notamment de diminuer les épaisseurs de matériaux aux endroits les moins critiques ;
- assemblage des matériaux : le collage ou le soudage par friction permettent des gains de masse par rapport aux techniques conventionnelles d'assemblage ;
- à plus long terme, des architectures de véhicules différentes de celles qui nous sont familières aujourd'hui peuvent être envisagées.

L'industrie aéronautique poursuit de façon continue ses efforts d'allégement des aéro-nefs depuis plusieurs décennies. Les avions de ligne de nouvelle génération intègrent massivement les composites (50 % des pièces de structure sur le Boeing 787 et l'Airbus

A350, qui seront mis en service respectivement en 2009 et 2010). L'allégement est un point critique dans l'aéronautique, en particulier pour les gros porteurs. Tous les postes sont concernés : pièces de structures, turbomachines, équipements (sièges...), câblage. Dans ce secteur, les nouvelles architectures (configuration « canard », ailes volantes...) ne devraient apparaître, au mieux, que dans 20 ans, si le coût élevé du carburant continue d'exercer une pression sur les compagnies aériennes et les constructeurs.

Ces dernières années, les automobiles ont vu leur poids augmenter sous l'effet de l'intégration d'équipements électroniques ou de sécurité, alors que dans le même temps les efforts pour l'allégement des structures se sont relâchés en raison du faible prix du pétrole. Avec son renchérissement et la prise en compte grandissante de l'impact des gaz à effet de serre, l'allégement redevient un des enjeux du secteur. Comme pour l'aéronautique, tous les postes sont concernés : structure, carrosserie, moteur, équipements intérieurs, câblage...

Dans le domaine du ferroviaire, l'allégement des véhicules n'a pas été prioritaire ces dernières années (la conception des wagons de fret date de plus de 50 ans).

L'allégement des véhicules impose non seulement des modifications sur les architectures et les matériaux utilisés mais également sur leurs procédés de mise en œuvre. Cet aspect est important dans le domaine automobile où les procédés doivent permettre de gagner en productivité. Les aciers plus résistants sont moins facilement formables ; les plastiques ou les composites ne se prêtent pas toujours aux procédés de peinture sur la chaîne de production.

Enjeux, Impact

Les enjeux essentiels qui poussent à l'allègement des véhicules sont la maîtrise des consommations énergétiques et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En France, les transports représentaient 27 % des émissions de gaz carbonique (CO₂) en 2002.

Face à l'enjeu que représente la réduction des émissions de gaz à effet de serre (notamment le CO₂), et dans le cadre des objectifs fixés par le protocole de Kyoto, la Commission européenne et les constructeurs automobiles présents sur le marché européen, par le biais de leurs associations respectives (Acea, Jama, Kama), ont conclu un accord volontaire : celui-ci prévoit des émissions de 140 g de CO₂/km en 2008, et une limite à 120 g/km à plus long terme. L'allègement des véhicules doit participer, avec l'évolution des motorisations, à l'atteinte de ces objectifs.

La maîtrise des consommations énergétiques s'exprime également en termes économiques. On retient que la réduction d'1 kg sur la masse d'un avion permet d'économiser plusieurs milliers d'euros en carburant tout au long de sa durée de vie. Dans l'automobile, les impacts économiques importants apparaissent en période de renchérissement des prix du pétrole. De ce point de vue, l'existence de véhicules peu consommateurs dans la gamme des constructeurs est un avantage concurrentiel important durant ces périodes.

Les aspects précédents doivent être considérés en prenant en compte les autres enjeux du secteur des transports, notamment la sécurité. Ainsi, les véhicules « allégés » doivent présenter des performances au moins aussi bonne d'un point de vue mécanique. Par ailleurs, certaines contraintes spécifiques existent en fonction des domaines. Dans l'automobile, la maîtrise des coûts et la recyclabilité sont des spécifications importantes pour le choix des matériaux.

Marché

Les transports aériens et automobiles sont les principaux secteurs concernés, mais l'allègement des véhicules a également des

impacts bénéfiques dans les domaines ferroviaires et maritimes.

L'importance du marché peut s'apprécier, par exemple pour le transport routier, simultanément au regard du nombre de véhicules commercialisés et des masses correspondantes. En 2004, le marché français des voitures particulières a atteint deux millions de véhicules et le marché européen quinze millions. Au niveau européen, ce chiffre correspond à un marché de 2,2 à 2,3 Mt de plastiques et de plus de 10,5 Mt d'acier. Au niveau mondial, l'industrie automobile consomme 10 à 15 % de l'acier produit.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie du solide, matériaux, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : chimie macromoléculaire, chimie de base, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail matériaux, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : EMC2 (Pays de la Loire), Mipi (Lorraine), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes), Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes).

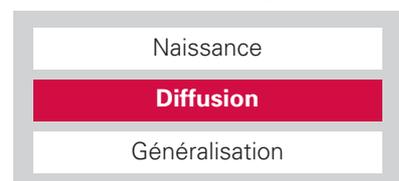
■ Liens avec (technologies) : sécurité passive des véhicules ; moteurs à pistons ; turbomachines ; architecture électrique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; modélisation, simulation, calcul ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; fonctionnalisation des matériaux ; assemblage multimatériaux ; textiles techniques et fonctionnels.

■ Principaux acteurs français

Centre de compétences : Cetim.

Industriels : Airbus, Alcan, Arcelor, Inoplast, Montupet, Plastic Omnium Auto Exterior, PSA Peugeot Citroën, Renault, Saint Gobain, Timet Savoie, Vallourec. Plus largement, tous les équipementiers et sous-traitants sont impliqués dans l'allègement des véhicules. C'est particulièrement vrai dans le domaine aéronautique où les cahiers des charges des constructeurs accordent la plus haute importance à la réduction de masse.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, fabrication de verre et d'articles en verre, chimie, caoutchouc, plastiques, métallurgie et transformation des métaux, services de transports.

Transport

Commentaires

Cette technologie bénéficie en France de la présence simultanée de donneurs d'ordres dans le domaine des transports et de fournisseurs de matériaux qui sont des leaders mondiaux. Ces acteurs ont sur le territoire

des centres de décisions en matière d'innovation. Cette technologie est globalement mature, mais les contraintes environnementales et économiques, ainsi que la concurrence entre les matériaux entretiennent l'innovation.



61. Sécurité passive des véhicules

Description

Lorsque la sécurité active n'a pas permis d'éviter l'accident, la sécurité passive des véhicules a pour fonction d'en minimiser les conséquences pour les personnes, qu'elles soient dans le véhicule ou à l'extérieur (piétons...).

La sécurité passive nécessite une approche multidisciplinaire. La structure du véhicule est le premier élément de sécurité passive. Pour les voitures, la structure absorbe une partie de l'énergie du choc, et fait de l'habitacle une cellule de survie qui préserve les occupants contre l'intrusion de tout élément, mécanique ou autre. Le choix des matériaux est primordial à cet égard. La prévention de ces intrusions est également assurée par une disposition judicieuse des organes les plus dangereux.

La sécurité passive passe également par l'utilisation de systèmes de sécurité gonflables (airbags) qui, initialement réservés au conducteur, se propagent au sein de l'habitacle : passager avant, passagers arrière, airbags latéraux ou « rideaux », pour les membres inférieurs, etc.

Outre les chocs, la sécurité passive doit également prémunir les passagers contre les dommages liés au feu. Les matériaux de structure ou de revêtement de l'habitacle doivent être peu (ou pas) inflammables et ne pas dégager de gaz toxiques en cas de combustion (notamment, transports collectifs : avions, trains).

Enfin, la frontière entre sécurité active et sécurité passive s'estompe, cette dernière devenant de plus en plus interactive avec les systèmes électroniques de type ESP, ABS, capteurs de roues... l'enjeu étant d'anticiper autant que faire se peut les situations « désespérées ». Alors que les airbags se déclen-

chent sur détection d'un choc effectif (décélération brutale), les systèmes les plus avancés modifient le réglage des sièges ou « pré-tensionnent » les ceintures de sécurité avant le choc.

La sécurité passive a connu de nombreux développements au cours des dernières années. Mais des travaux restent nécessaires. Il s'agit de maintenir, et même d'améliorer, les performances en matière de sécurité alors que les matériaux et les architectures évoluent, notamment pour alléger les véhicules ou en vue de leur recyclage. De ce point de vue, les performances améliorées (en particulier mécaniques) à masse réduite des matériaux nanostructurés et nanocomposites seront probablement exploitées.

Enjeux, Impact

On estime à un million par an le nombre de morts dans les transports dans le monde (5 000 en France), principalement dans les transports routiers (y compris les piétons). Les blessés se comptent en millions. Les technologies de sécurité des véhicules, en particulier de sécurité passive, permettent de répondre à cet enjeu de société majeur.

Marché

Les marchés concernés couvrent tous les modes de transport. Des technologies de sécurité passive ont été développées depuis plusieurs décennies, mais sont à nouveau un sujet d'intérêt dans un domaine comme l'aéronautique.

La problématique de la sécurité passive est largement répandue dans le domaine automobile, et sa croissance est moins forte que celles des technologies de sécurité active des véhicules. Ainsi, le marché automobile européen de la sécurité passive était estimé

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

à 2,8 Md€ en 2003, et devrait atteindre 3 Md€ en 2010.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : matériaux, énergétique, mécanique, génie des matériaux.
- Compétences technologiques : traitements de surface, matériaux-métallurgie, travail des matériaux, composants mécaniques, transports.
- Pôles de compétitivité : Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes).
- Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre ; sécurité active des véhicules ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules.

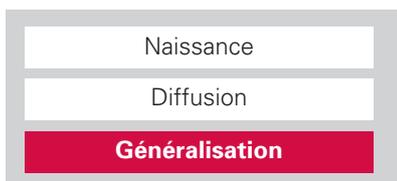
■ Principaux acteurs français

Dans les domaines automobile et ferroviaire, les travaux de recherche en matière de sécurité (dont sécurité passive) sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres-www.predit.prd.fr).

Centres de compétences : Inrets, Onera... Industriels: Alstom, EADS-Airbus, Faiveley Transport, Faurecia, PSA Peugeot Citroën, Renault, Safran, Thales, Valéo...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs et équipementiers automobiles travaillent sur la sécurité passive des véhicules. Les constructeurs et équipementiers de l'aéronautique et du ferroviaire sont également concernés.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application





62. Moteurs à pistons

Description

Développées et adaptées aux premières automobiles depuis le XIX^e siècle, les technologies des moteurs à pistons n'ont cessé de progresser. Aujourd'hui, l'innovation technologique est tirée par un double objectif : diminuer les consommations (en augmentant les rendements des moteurs) et réduire les émissions polluantes. Les réactions de combustion mises en jeu sont telles que ces objectifs peuvent difficilement être atteints simultanément, et qu'un optimum doit être recherché. Parallèlement, des technologies de traitement des gaz de combustion sont développées pour compléter les performances environnementales, et la qualité des carburants évolue. Les améliorations à apporter doivent être considérées du point de vue de l'ensemble du système et non pas seulement de la combustion.

Les innovations technologiques récentes concernent différents aspects :

- combustion : l'optimisation des chambres de combustion bénéficie des progrès de la modélisation numérique ;
- électronique : la plupart des paramètres de contrôle du moteur (injection, allumage, alimentation en air...) sont désormais pilotés avec une grande précision ;
- injection : l'apparition des systèmes d'injection haute-pression a permis une amélioration des performances des moteurs Diesel, grâce à une meilleure pulvérisation du carburant.

Des progrès importants sont encore possibles. On estime que les futurs moteurs Diesel et essence pourraient permettre des gains en consommation de 25 % à 30 % par rapport aux moteurs conventionnels actuels (à masse et motorisation du véhicule identiques). Ces progrès sont très fortement liés à

l'évolution des systèmes de contrôle et d'injection et de la modélisation.

Pour le moteur Diesel, les technologies en développement sont la combustion HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*) et les systèmes d'injection multiples (grâce à des systèmes de commande piézoélectriques très précis). La généralisation de la turbo-suralimentation, notamment à géométrie variable, permettra un rendement amélioré sur toute la gamme du régime moteur. La seule optimisation du fonctionnement du moteur ne suffira pas à respecter les limites réglementaires pour les émissions polluantes. Des technologies de post-traitement doivent également être mises en œuvre : filtres à particules et pièges à Nox pour les véhicules légers, filtres à particules et réduction catalytique sélective (SCR) pour les poids lourds.

L'enjeu pour le moteur à essence réside dans la réduction des émissions de CO₂, donc l'amélioration de son rendement énergétique. À l'horizon 2010, la généralisation de l'injection directe d'essence est une première réponse à cet enjeu. Mais la recherche actuelle porte déjà sur les concepts et systèmes qui seront mis en œuvre d'ici 10 à 15 ans : combustion par auto-inflammation (CAI - allumage par compression, sans bougie, comme dans le cas du Diesel) ; systèmes électroniques de distribution variable, pouvant aller à terme jusqu'à la technologie *camless* (suppression de l'arbre à cames), pour un réglage optimal en fonction des conditions d'utilisation du moteur ; *downsizing*, correspondant à une réduction de cylindrée couplée à la turbo suralimentation pour un maintien des performances ; taux de compression variable (VCR).

Ces évolutions sur les motorisations conven-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

tionnelles garantissent l'amélioration des performances environnementales des véhicules de transport avant le déploiement significatif des modes de propulsion alternatifs de rupture : moteurs électriques, piles à combustibles... Elles accompagnent également le déploiement des modes de propulsion hybrides, en renforçant leur rendement. Par ailleurs, ces évolutions se font en parallèle avec l'évolution des carburants. Des moteurs à pistons conventionnels peuvent être adaptés pour pouvoir utiliser des proportions croissantes de biocarburants (éthanol, diesters...), ou fonctionner avec des carburants gazeux (GNV...).

Enjeux, Impact

En 25 ans, la consommation de carburant liée aux transports a augmenté de 70 % en France, en raison de :

- la croissance continue des trafics de marchandises et de voyageurs, ainsi que des distances parcourues ;
 - la progression du transport routier, le plus consommateur et le plus polluant ;
 - l'augmentation de la mobilité urbaine et périurbaine, due à l'extension des villes.
- Il en est résulté, malgré les progrès techniques :
- un accroissement des émissions polluantes ;
 - un accroissement des émissions de gaz à effet de serre (gaz carbonique), responsables du changement climatique.

Les transports représentent, aujourd'hui, une part importante de certaines émissions polluantes et de gaz à effet de serre. Au niveau européen, la contribution des transports aux émissions d'oxydes d'azote (Nox) et de monoxyde de carbone (CO) atteint près de 70 % ; en France, les transports représentaient 27 % des émissions de gaz carbonique (CO₂) en 2002.

Pour la France, l'enjeu de la maîtrise de cette technologie est de :

- contribuer aux indispensables efforts de réduction des émissions polluantes et de gaz à effet de serre au niveau mondial ;
- pérenniser et développer l'expertise technique et industrielle française en matière de moteurs à pistons, avec les conséquences positives en termes d'emploi et de balance commerciale.

Les enjeux environnementaux trouvent déjà largement leur traduction aux niveaux réglementaires et normatifs en Europe (ainsi qu'aux États-Unis et au Japon par exemple). Au niveau européen, les directives 70/220/EEC (consolidée), 88/77/EEC (consolidée), notamment, se déclinent au travers des normes d'émissions : euro 4, euro 5, euro 6.

Le principal impact sera le renforcement de la compétitivité de l'industrie française dans les moteurs et les secteurs d'application. L'horizon temporel prévisible de l'impact, pour une amélioration de la technologie, est de 5 ans (délai cumulé de R&D et d'industrialisation des nouvelles solutions développées).

Marché

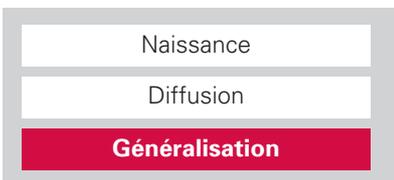
Les applications des moteurs à pistons dans les transports sont multiples :

- transport routier : deux roues, voitures, véhicules utilitaires, poids lourds ;
- ferroviaire : locomotives, trains automoteurs ;
- propulsion navale ;
- aviation légère ;
- production d'électricité ;
- machines agricoles.

Les moteurs à pistons représentent un marché d'environ 120 millions d'unités par an dans le monde, dont plus de la moitié sont destinés au secteur des transports routiers. Ainsi 45 millions de moteurs à essence et 12 millions de moteurs Diesel pour l'automobile sont concernés chaque année, ainsi que trois millions de moteurs Diesel pour les poids lourds et les bus et un million de moteurs au gaz (essentiellement pour les bus).

Le marché des transports routiers est véritablement celui qui tire l'innovation technologique, en particulier parce qu'il est soumis aux réglementations les plus drastiques et que la concurrence y est très développée. Le marché mondial des moteurs à pistons pour automobiles connaît des disparités régionales importantes. Les moteurs Diesel ont connu un essor très important en Europe depuis dix ans, alors que les marchés japonais et surtout nord-américain restent quasi exclusivement réservés aux moteurs à essence. Ces trois grands marchés sont sou-

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



mis à des réglementations spécifiques, qui diffèrent, notamment, sur les seuils d'émissions et les méthodes de mesure. Globalement, ces réglementations convergent sur les aspects liés aux émissions polluantes. En revanche, le contexte réglementaire en matière de gaz à effet de serre est très hétérogène.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, énergétique, mécanique des fluides, mécanique, génie des matériaux, électronique.

■ Compétences technologiques : traitements de surface, matériaux-métallurgie, travail des matériaux, environnement-pollution, moteurs-pompes-turbines, procédés thermiques, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Céramique (Limousin et Midi-Pyrénées), Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : carburants de synthèse issus de la biomasse ; turbomachines ; acoustique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules, architecture électrique des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; modélisation, simulation, calcul ; procédés catalytiques.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Certam (Rouen), Coria (Rouen), IFP.

Industriels : Le Moteur moderne, MCE-5,

PSA Peugeot Citroën, Renault, Renault Trucks, Semt Pielstick.

Dans le domaine des transports routiers, des travaux de recherche en matière de motorisation sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres-www.predit.pr.d.fr).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs et les équipementiers automobiles sont impliqués dans les évolutions technologiques sur les moteurs à pistons. La liste ci-dessous propose une sélection des industriels et centres de compétences particulièrement actifs (hors France) : Bosch (Allemagne), Caterpillar (États-Unis), Delphi (États-Unis), Ford (États-Unis), Honeywell-Garrett (États-Unis), Mitsubishi Motors (Japon), Nissan (Japon), Toyota (Japon), Ricardo (UK), Université de Lund (Suède), Wärtsilä (Finlande).

Commentaires

L'innovation dans le domaine est largement conditionnée par les objectifs de réduction des consommations et de limitation des émissions polluantes. Les options technologiques pour le respect des limites réglementaires en matière d'émissions polluantes à l'horizon 2010 sont déjà levées : il reste à les mettre au point et à les industrialiser. L'innovation technologique se situe plus en amont, sur des systèmes et concepts qui seront sur les marchés à l'horizon 2015 - 2020. L'expertise technologique et industrielle française en matière de moteurs à pistons est très importante.

Transport



63. Turbomachines

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Le cœur d'une turbomachine est constitué d'un ensemble compresseur-chambre de combustion-turbine. L'énergie primaire est fournie par la combustion d'un mélange air-combustible réalisé dans une chambre de combustion. Les gaz de combustion sont détendus dans une turbine, dont la partie mobile entraîne mécaniquement le rotor d'un compresseur qui établit un débit d'air et le comprime avant son admission à la chambre de combustion. En sortie de cet ensemble, les gaz chauds possèdent une énergie élevée qui est valorisée sous forme de poussée (détente dans une tuyère) ou de couple sur un arbre (détente et mise en rotation d'une turbine). Dans le cas des turboréacteurs à grand taux de dilution des avions de transport, l'utilisation de cette énergie est mixte (poussée et entraînement d'un « compresseur basse pression »).

À partir de ce principe simple, une turbomachine est un système d'une grande sophistication et d'une grande complexité, dont le développement et la mise au point nécessitent l'expertise d'équipes pluridisciplinaires de haut niveau. Les axes de recherche et développement visent, globalement, à réduire la consommation et la pollution (toutes applications), tout en allégeant le moteur (dans l'aéronautique) et en réduisant les dépenses d'entretien. Les recherches concernent les axes de travail suivants :

- l'architecture d'ensemble : les sous-ensembles constitutifs d'une turbomachine sont composés d'éléments aérodynamiques (aubes de compresseur ou de turbines) qui ont des plages de fonctionnement optimal restreintes. Il est donc nécessaire de concevoir des turbomachines à plusieurs corps (un corps est un ensemble solidaire compres-

seur-arbre-turbine), chaque corps tournant à une vitesse différente. Si le « double corps » a longtemps été le plus répandu, le constructeur britannique Rolls-Royce maîtrise l'architecture « triple corps » (famille de moteurs Trent, dont les Airbus A380 et A350 pourront être équipés). L'architecture à arbres contrarotatifs permet d'optimiser les transferts d'énergie entre turbines, et donc de réduire la consommation. Pour les applications de surface (trains, navires, énergie), le relâchement des contraintes de masse et d'encombrement permet d'exploiter d'autres pistes : échangeurs thermiques entre étages, pré ou post-traitement des gaz, cogénération... ;

- le dessin aérodynamique des composants (disques et aubes, chambres de combustion) bénéficie de progrès continus, rendus possible en particulier par la simulation numérique ;
- les éléments d'une turbomachine sont soumis à des vitesses de rotation (éléments tournants) et des températures élevées, et doivent être constitués de nouveaux matériaux à la fois plus légers et plus résistants : matériaux composites à matrice organique (parties froides), matériaux composites à matrice métallique ou intermétallique (titane, aluminium, niobium) pour les parties plus chaudes, superalliages à base de nickel pour les aubes et les disques de turbines, matériaux céramiques... ;
- la chambre de combustion est optimisée pour répondre à des critères contradictoires : une température de combustion élevée est en effet favorable à un bon rendement énergétique, mais produit des oxydes d'azote. Les chambres de combustion sont de plus en plus compactes et de plus en plus complexes : à double tête, à prémélange, à combustion turbulente... ;
- la régulation électronique des turbomachi-

nes FADEC (*Full Authority Digital Engine Control*) contribue à l'optimisation des performances d'ensemble ;

- enfin, les turbomachines intègrent des technologies nécessaires à la réduction du bruit, à la résistance à l'ingestion de corps étrangers (moteurs aéronautiques), à la lubrification, etc.

Enjeux, Impact

L'enjeu pour la France de la maîtrise de cette technologie est de :

- contribuer aux indispensables efforts de réduction des émissions polluantes et de gaz à effet de serre au niveau mondial ;
- pérenniser et développer des pans entiers de l'économie (aéronautique, transports de surface, production d'énergie,...), avec les conséquences positives en termes d'emploi et de balance commerciale.

Le principal impact sera le renforcement de la compétitivité de l'industrie française dans les moteurs aéronautiques, les turbines de puissance, et par conséquent dans les secteurs d'application. Les processus de développement industriel conduisent rarement à concevoir « depuis une page blanche » une turbomachine entièrement nouvelle : le plus souvent il s'agit de perfectionnements successifs de systèmes existants, qu'on vient enrichir de briques technologiques issues des centres de R&D. On ne peut donc pas définir d'horizon calendaire pour l'impact de ces technologies. Gardons cependant à l'esprit qu'une innovation disponible aujourd'hui dans un laboratoire ne sera pas intégrée sur une turbomachine opérationnelle avant typiquement 5 ans, compte tenu des cycles industriels et des démarches de qualification nécessaires (et de certification pour les aéronefs).

Marché

La propulsion aéronautique est le principal moteur des progrès technologiques des turbomachines :

- turboréacteurs des avions militaires (Rafale, Mirage 2000), des avions de transport civils (familles Airbus et Boeing, certains avions de transport régionaux) ;
- turbopropulseurs des avions de transport régionaux (ATR) ou militaires (Transall, prochainement remplacé par l'Airbus 400M) ;

- turbomoteurs des hélicoptères.

Plus de 15 000 nouveaux avions commerciaux devraient entrer en service entre 2005 et 2020, tous équipés de turbomachines.

Les turbomachines sont également utilisées pour la propulsion de certains trains ou navires (Queen Mary II), et pour la production d'électricité. Pour cette dernière application, les centrales à cycles combinés incluant des « turbines à gaz » présentent une grande flexibilité, notamment pour leur construction (les délais de réalisation sont d'environ deux ans, contre quatre ans pour une centrale à charbon propre, et huit ans pour une tranche nucléaire). La conception de ces centrales, généralement modulaire, permet d'ajuster le rythme d'évolution du parc à celui de la demande électrique. Leur mode de fonctionnement permet aussi de moduler la puissance en service de façon souple, grâce à la grande rapidité de démarrage d'une telle centrale (couverture des « pics » de demande électrique).

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : composantes électroniques et génie électronique, informatique, sciences des matériaux, mathématiques et algorithmique, génie industriel, physique appliquée, physico-chimie, génie mécanique et de la construction, génie aérospatial.

■ Compétences technologiques : production et utilisation de l'énergie électrique, stockage de l'énergie électrique, composantes électroniques, informatique, analyse, mesure, contrôle, génie des procédés, traitement de surface, matériaux, métallurgie, environnement, pollution, environnement : traitement du bruit, moteurs thermiques, transports terrestres et équipements.

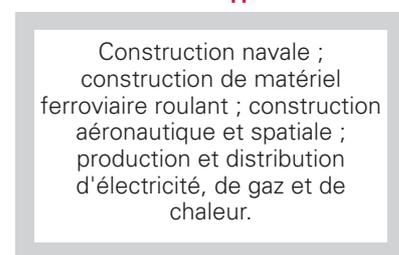
■ Liens avec (technologies) : carburants de synthèse issus de la biomasse ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; moteurs à pistons ; acoustique des véhicules ; architecture électrique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; modélisation, simulation, calcul ; capteurs intelligents et traitement du signal ; assemblage multimatériaux ; nouveaux procédés de traitement de surface.

■ Pôles de compétitivité : Normandy Motor

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Transport

Valley (Basse et Haute-Normandie), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Céramique (Limousin et Midi-Pyrénées).

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Onera, DGA (Centre d'essais des propulseurs), École centrale Lyon (Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique)...

Industriels : Groupe Safran (Snecma, Turbomeca), Alstom...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : General Electric (États-Unis), Pratt & Whitney (États-Unis, Canada), Rolls-Royce (Royaume-Uni), Siemens Power Generation

(Allemagne), MTU (Allemagne), MAN (Allemagne), Volvo (Suède),...

Commentaires

Les activités moteurs du groupe Safran en font le 4^e motoriste mondial, derrière General Electric, Rolls-Royce et Pratt & Whitney. La coentreprise CFM (Snecma - General Electric) est un exemple de coopération transatlantique réussie.

Les transferts de technologie du monde aéronautique vers les turbines terrestres ou marines permettent des progrès continus dans les rendements de ces systèmes.



64. Acoustique des véhicules

Description

Cette famille de technologies vise à réduire les nuisances acoustiques engendrées par les véhicules qui touchent, d'une part les passagers, d'autre part les riverains des voies de circulation (aériennes, terrestres). Il s'agit de lutter contre les bruits émis par quatre types de sources : l'ensemble propulsif, l'aérodynamique du véhicule, le contact roue-voie, les équipements. Les contributions respectives de ces sources au bruit généré par le véhicule dépendent notamment de la vitesse du véhicule. À faible vitesse, le bruit de l'ensemble propulsif sera généralement prépondérant, alors que les bruits aérodynamiques le deviennent à haute vitesse.

La réduction du bruit fait appel à plusieurs méthodes qu'il convient d'associer dans une logique « système », qui implique :

- la conception des sous-ensembles, en intégrant « en amont » les préoccupations acoustiques : dessin aérodynamique de l'enveloppe du véhicule ou des aubes de turbomachines, choix des matériaux ad hoc, intégration dans le véhicule des sources de bruit, pour masquer le bruit ou privilégier sa propagation dans une direction moins nuisible ;
- la disposition, autour des sources de bruit, de matériaux ou d'organes ayant pour effet d'absorber les vibrations (pour éviter leur propagation dans l'atmosphère ou au reste du véhicule) ;
- le contrôle actif du bruit, qui consiste, quand il s'avère impossible de réduire suffisamment un bruit à la source ou par l'adjonction de dispositifs absorbants, à générer un bruit en opposition de phase, qui annule le bruit contre lequel on veut lutter.

Enjeux, Impact

En France, les études de l'Insee sur la qualité de vie dans les agglomérations de plus de 50 000 habitants montrent que le bruit reste la première source de nuisances ressenties par les populations citadines.

La directive cadre 2002/49/CE est relative à l'évaluation et la gestion du bruit ambiant dans l'environnement. Pour le transport aérien, la directive relative à l'établissement de règles et de procédures concernant l'introduction de restrictions d'exploitation liées au bruit dans les aéroports de la Communauté a été adoptée le 26 mars 2002 (directive 2002/30/CE).

On attend de la maîtrise de cette technologie un impact sur :

- la compétitivité économique globale, par amélioration de la qualité de vie de millions de Français (et donc réduction des pathologies causées par le bruit) ;
- la compétitivité économique du secteur des transports.

Marché

Selon l'Ademe, 80 % du bruit dans l'environnement (territoire français) est produit par le secteur des transports routiers (68 %), aériens (20 %) et ferroviaires (12 %). Alors que l'OMS (Organisation mondiale de la santé) recommande un niveau de bruit ambiant inférieur à 35 dB pour un repos nocturne convenable, on dénombre en France près de 3 000 points noirs, représentant plus d'un million de personnes, pour lesquels le bruit ambiant ne descend jamais sous 65 dB. Dans le cas du transport aérien, les perspectives de croissance du trafic permettent d'anticiper l'évolution des nuisances sonores associées. On prévoit ainsi que, au cours des vingt prochaines années, les transports

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

aériens de passagers et de fret pourraient augmenter respectivement de 4,9 % par an et 6,4 % par an (en volume). En 2021, le nombre d'appareils en circulation dans le monde pourrait atteindre 32 500 unités.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : matériaux, physique théorique, mécanique des fluides, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux, génie civil.
- Compétences technologiques : traitements de surface, matériaux - métallurgie, travail des matériaux, environnement - pollution, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques, transports.
- Pôles de compétitivité : EMC2 (Pays de la Loire), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île -de-France), Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes).
- Liens avec (technologies) : architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; turbomachines ; moteurs à pistons ; acquisition et traitement de données.
- Principaux acteurs français
Centres de compétences : DGA (Centre

d'essais des propulseurs), IAT-Cnam (St-Cyr l'École), Inrets (LICIT, LTE), LCPC, LMFA (Lyon), Onera, Service technique de l'aviation civile.

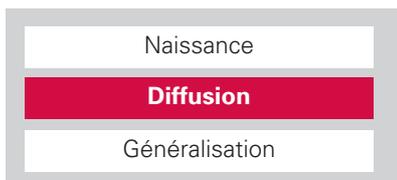
Industriels : 01dB Metravib, Alstom, EADS-Airbus, Dassault Aviation, EADS-Eurocopter, Faiveley Transports, Foampartner, PSA Peugeot Citroën, Renault, SnCF, Snecma et Turbomeca (Groupe Safran), Vibratéc.

Dans le domaine des transports terrestres, la mise en commun des compétences et moyens des acteurs français est notamment réalisée au sein du CNRT R2A (Centre national de recherche technologique aérodynamique et aéroacoustique des véhicules terrestres - www.cnrtr2a.asso.fr) et du GIE S2A (Soufflerie aéroacoustique automobiles - www.gies2a.fr).

Commentaires

Les bruits des transports sont considérés comme une nuisance environnementale importante en Europe. En France et en Allemagne, les ministères et agences concernés ont décidé de renforcer la coopération en matière de recherche sur le bruit des transports terrestres au sein de la structure Deufrako (www.deufrako.org).

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application





65. Architecture électrique des véhicules

Description

L'électricité prend une place prépondérante dans le schéma énergétique des véhicules, notamment dans la distribution interne d'énergie, ce qui entraîne :

- la disparition programmée de l'énergie hydraulique ou pneumatique à bord des avions (concept de l'avion « tout électrique »), les différents actionneurs hydrauliques étant remplacés par des organes mécatroniques (surfaces de contrôle aérodynamique, trains d'atterrissage, freins...). Les répercussions de cette tendance ont des conséquences immédiates sur l'allègement de l'appareil, mais également des conséquences indirectes, comme sur les moteurs qui verront bientôt disparaître le prélèvement d'air (conséquences positives, puisque le prélèvement d'air sur les moteurs écarte leur point de fonctionnement de l'optimum). Le besoin électrique global d'un avion gros porteur s'approche de 1 MW ;

- l'augmentation de la quantité d'équipements électriques à bord des véhicules automobiles : direction assistée électrique, le pare-brise chauffant, une climatisation électrique... sans omettre l'hybridation plus ou moins poussée de la motorisation des véhicules routiers (association au moteur thermique d'un moteur électrique ou d'un alternateur-démarrateur). Une berline consommera bientôt 1 kW d'énergie électrique.

Ces tendances rendent nécessaires des architectures électriques assurant la distribution de la puissance électrique en fonction des besoins. Les avions utilisent depuis longtemps le 28 V continu et le 115 V alternatif. Concernant l'automobile, le passage de la tension standard évoluera, avant 2010, de 12 V à 42 V.

Les principales problématiques de ces tech-

nologies sont la recherche de compromis entre sûreté de fonctionnement et performances système, ainsi que l'intégration d'organes électriques multifonctionnels (par exemple, assurant filtration du signal électrique et stockage).

Le principal verrou de cette technologie concerne l'intégration électronique de puissance. Il s'agit d'intégrer des convertisseurs électroniques de puissance à base de MOS (*Métal-Oxyde-Semi-conducteur*) de puissance ou d'IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, en français transistor bipolaire à grille isolée), afin de créer une rupture technologique pour réduire les masses, volumes et coûts de façon significative. Cet ensemble concerne les matériaux substrats, les semi-conducteurs de puissance, le Sic (carbone de silicium), le diamant, les technologies de report et de packaging, le fonctionnement à haute température (200°C) et les techniques de refroidissement actives et passives. Les méthodes de construction robustes et les process critiques d'assemblage sur ligne pilote représentent des enjeux forts.

Enjeux, Impact

Cette technologie est au cœur de toute stratégie de contrôle de l'énergie et des systèmes hybrides. Elle participe à l'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules et contribue à réduire les effets de serre.

Les industriels leaders en matière d'innovation auront également un avantage dans l'établissement des standards et normes, et en matière de compétitivité.

Marché

Tous les modes de transport sont concernés : la conversion d'énergie pour la commande de moteur électrique de propulsion

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

ferroviaire, automobile (véhicule hybride), les commandes de tous les actionneurs de l'avion « tout électrique », les véhicules militaires, la propulsion marine, les tracteurs agricoles... Plus généralement, tout système qui nécessite de disposer d'une commande électronique de puissance (de 500 watts à plusieurs centaines de kilowatts), dans un encombrement faible et un environnement difficile, fait appel à cette technologie.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : mécanique, informatique, traitement du signal, électronique.
- Compétences technologiques : composants électriques, informatique, analyse, mesure et contrôle, procédés techniques.
- Pôles de compétitivité : Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), System@tic (Île-de-France), Véhi-

cule du futur (Alsace et Franche-Comté), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes), Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes).

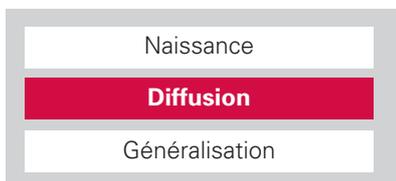
■ Liens avec (technologies) : sécurité active des véhicules ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; moteurs à pistons ; turbomachines ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : IEMN (Lille), LEEI (Toulouse), Onera, Laboratoire Pearl (Tarbes). Industriels : Acome, Airbus, Alstom, ESI Group, Eve System, Faurecia, Labinal (Groupe Safran), Nexans, PSA Peugeot Citroën, Renault, Schneider Electric, Valéo.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs de véhicules et les équipementiers. Dans le domaine automobile : Boeing (États-Unis), Delphi (États-Unis), Lear (États-Unis), Tyco (États-Unis), Denso (Japon), Bosch (Allemagne), Siemens VDO (Allemagne) ...

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application





66. Architecture électronique des véhicules

Description

L'électronique à bord des véhicules permet d'assurer un nombre croissant de fonctions plus ou moins critiques :

- communications (téléphonie, médias...) ;
- aides au voyage (positionnement, informations trafic...) ;
- aides à la conduite et sécurité (ABS, ESP, direction assistée...) ;
- régulation des organes principaux (allumage moteur, boîte de vitesse...).

Une berline actuelle embarque plus d'électronique que les premiers Airbus, et l'extrapolation des tendances conduit à la vision suivante : l'automobile de 2010, comme l'ordinateur personnel d'aujourd'hui, sera composé de modules électroniques assurant des fonctions plus ou moins étendues, gérés par un « système d'exploitation ».

Globalement, les problématiques seront donc très proches de celles de l'informatique (intégration logiciel-matériel, arbitrage entre répartition ou centralisation des fonctions, miniaturisation, protocoles de communication, interopérabilité...), sans oublier l'impérieuse exigence de fiabilité et de robustesse. L'évolution des matériels et des architectures électroniques impose des améliorations en termes de processus d'ingénierie des systèmes embarqués et d'ingénierie des systèmes complexes. Les verrous associés à ces technologies constituent les principaux freins à la mise au point technique de l'architecture électronique des véhicules.

Par ailleurs, l'architecture électronique ne peut plus être élaborée sans interaction forte avec l'architecture électrique des véhicules. La rationalisation des réseaux de câbles au sein des véhicules conduit, en effet, à envisager l'utilisation des techniques de courants porteurs (PLC ou *Power Line Communication*).

Enfin, l'architecture électronique des véhicules doit être réalisée pour permettre une évolution des systèmes en parallèle avec l'évolution des informations extérieures au véhicule qui lui sont transmises.

Enjeux, Impact

Les principaux enjeux et impact de la mise au point d'une architecture électronique des véhicules performante sont associés aux enjeux du développement des fonctions critiques comme le contrôle de la propulsion (impact sur les émissions de gaz à effet de serre) et la sécurité.

Par ailleurs, cette architecture électronique améliorée accompagne le développement de véhicules à plus forte valeur ajoutée. Ceci garantit, par l'innovation, la compétitivité des industries françaises de construction de véhicules.

Marché

Les marchés de l'électronique pour véhicules sont dynamiques, particulièrement pour l'automobile. Le marché de l'électronique pour automobile a progressé plus vite que le marché global de l'électronique et que la production de véhicules. L'électronique automobile devrait progresser à un rythme voisin de 7 % par an (en valeur) d'ici à 2010. À cette période, l'automobile pourrait représenter 9 % du marché de l'électronique européen, et l'aérospatiale et la défense 6,5 %. Ces chiffres sont confirmés dans le cas particulier des semi-conducteurs : les ventes de semi-conducteurs destinés aux systèmes automobiles représenteront 16,3 Md\$ en 2005 et devraient même grimper à 25,7 Md\$ d'ici 2012.

La part de l'électronique dans l'automobile est en progression. Elle devrait atteindre

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

30 %, en valeur, en 2008. Une partie importante du contenu électronique sera à terme représentée par le logiciel embarqué. On estime qu'en 2010 plus de 40 % de la valeur de l'électronique automobile se situera dans le logiciel.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : mécanique, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques, transports.

■ Pôles de compétitivité : Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île - de-France), Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou-Charentes).

■ Liens avec (technologies) : ingénierie des

systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; moteurs à pistons ; turbomachines ; architecture électrique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules.

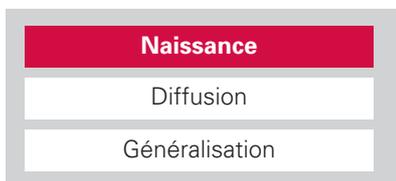
■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inrets, Inria, LAAS (Toulouse), Loria (Nancy).

Industriels : Airbus, Alstom, Dassault Electronique, Faurecia, PSA Peugeot Citroën, Renault, Safran, ST Microelectronics, Thales, Valéo.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : l'ensemble des constructeurs et équipementiers des transports sont impliqués. À titre d'exemple, dans l'automobile, Delphi (États-Unis), Lear (États-Unis), Tyco (États-Unis), Honeywell (États-Unis), Johnson Controls (États-Unis), Visteron (États-Unis), Denso (Japon), Bosch (Allemagne), Siemens VDO (Allemagne)... sont concernés par cette technologie.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application





67. Gestion de l'énergie à bord des véhicules

Description

Un véhicule est un système dans lequel trois sources d'énergie sont étroitement liées : l'énergie mécanique, qui sert à mettre en mouvement le véhicule ou certains sous-ensembles (surfaces de contrôle des avions, direction d'une voiture...), l'énergie électrique, nécessaire notamment pour l'alimentation de diverses fonctions (éclairage, communications...), et l'énergie thermique (climatisation de l'habitacle, chaleur produite par le moteur ou le freinage...). Jusqu'à un passé récent, peu d'efforts étaient engagés pour optimiser la gestion de ces énergies : le pétrole, abondant et bon marché, fournissant, par combustion dans le moteur, l'énergie mécanique, dont une partie était transformée en électricité (par l'alternateur), une grande partie de l'énergie thermique étant perdue. C'est une des raisons qui fait que, malgré des progrès indéniables accomplis sur les moteurs, l'ordre de grandeur de la consommation des véhicules routiers n'a pas changé depuis trente ans, passant de 10 à 7 litres pour 100 km. Par ailleurs, certains équipements consommateurs d'énergie se démocratisent. La climatisation automobile devient ainsi un poste de consommation énergétique de plus en plus important.

L'objet de cette technologie est d'optimiser le rendement énergétique global des véhicules par une valorisation d'une partie de l'énergie aujourd'hui perdue. À titre d'illustration, des développements plus ou moins aboutis explorent les pistes suivantes (automobile) :

- récupération et stockage à bord, sous forme d'énergie électrique, de l'énergie dissipée lors du freinage ;
- valorisation de l'énergie solaire absorbée par un véhicule en stationnement ;
- récupération et conversion de l'énergie

thermique du moteur ou du pot d'échappement, valorisée sous forme d'électricité (par la thermoélectricité, par exemple) ;

- hybridation plus ou moins poussée, consistant à associer un moteur électrique, ou un alerno-démarrreur, au moteur thermique, pour la propulsion du véhicule dans certaines phases de conduite.

Les principaux verrous qui freinent le développement de ces technologies sont économiques. L'intégration de ces technologies conduira à augmenter le coût de développement et de construction des véhicules. En 2005, les consommateurs (pour ce qui concerne l'automobile) ne semblent pas prêts à faire le pari d'un surcoût à l'achat, en contrepartie d'une baisse du coût d'exploitation. La période de pétrole bon marché, dont nous sortons à peine, a en outre ralenti ou stoppé les développements industriels et bon nombre de recherches publiques sur ces sujets. En outre, le transport ne paie pas les externalités qu'il engendre.

Sur le plan technique, la disponibilité de composants électroniques de puissance, en quantité suffisante et à des coûts abordables, rendra possible la diffusion de la technologie. Enfin des avancées restent nécessaires pour améliorer la capacité des dispositifs de stockage de l'énergie électrique, en particulier les batteries.

Enjeux, Impact

En 25 ans, la consommation de carburant liée aux transports a augmenté de 70 % en France, en raison de :

- la croissance continue des trafics de marchandises et de voyageurs ainsi que des distances parcourues ;
- la progression du transport routier, le plus consommateur et le plus polluant ;

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

- l'augmentation de la mobilité urbaine et périurbaine, due à l'extension des villes.

Il en résulte, malgré les progrès techniques, un accroissement des émissions de gaz à effet de serre (gaz carbonique), responsables du changement climatique. La part liée aux transports pourrait représenter 27 % des émissions françaises en 2010, contre 22 % en 1990.

D'après les études menées par des constructeurs automobiles, 80 % de l'énergie consommée serait perdue sur les automobiles : 60 % de pertes thermiques, 10 % par frottement et 10 % par pompage. L'énergie mécanique disponible représenterait ainsi 20 % de l'énergie consommée.

L'enjeu pour la France de la maîtrise de cette technologie est de :

- contribuer aux indispensables efforts de réduction des émissions polluantes et de gaz à effet de serre au niveau mondial ;
- pérenniser et développer l'industrie des équipements de transport, avec des conséquences positives en termes d'emploi et de balance commerciale ;
- devenir leader dans le domaine réglementaire et normatif.

L'impact sera progressif, car ces technologies ne seront pas intégrées simultanément dans les véhicules. Un ordre de grandeur réaliste est une réduction de 30 % de la consommation des véhicules à horizon de dix ans. La compétitivité de l'industrie française des constructeurs et équipementiers de véhicules sortira renforcée de l'adoption de ces technologies.

Marché

Tous les types de transports sont concernés par les problématiques de gestion de l'énergie. Le marché automobile reste encore peu exploité, mais les technologies liées à la gestion de l'énergie devraient fortement s'y développer. À titre d'exemple, on attend une croissance très importante du marché (aujourd'hui peu développé) des batteries pour véhicules hybrides et électriques à l'horizon 2010. Le taux de croissance annuel pourrait atteindre 50 % en valeur sur la période 2005-2008, pour un marché de 250 M\$ en 2008.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : énergétique, mécanique, génie des matériaux.

■ Compétences technologiques : composants électriques, procédés techniques, environnement - pollution, moteurs - pompes - turbines, procédés thermiques, composants mécaniques, transports, spatial - armement.

■ Liens avec (technologies) : infrastructures routières intelligentes ; moteurs à pistons ; turbomachines ; architecture électrique des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; capteurs intelligents et traitement du signal.

■ Pôles de compétitivité : EnRRDIS (Rhône-Alpes), Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes).

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, École des mines (Paris), Ierset (Toulouse), IFP, Inria, Green (Nancy), Inrets (LTE, LTN), LEEI (Toulouse).

Industriels : Alstom Transport, Dassault, EDF, ESA, Faiveley Transport, Irisbus, Labinal (Groupe Safran), Safran, Saft, Schneider Electric, Siemens VDO, Valéo, Thales.

Pour en savoir plus, une base de données des acteurs du domaine est disponible en ligne sur le site du Cereveh (Centre d'études et de recherches sur les véhicules électriques et hybrides - www.cereveh.org/fr/inter-net/annu.htm).

Les travaux de recherche en matière de véhicules routiers économes sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - www.predit.prd.f).

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, recherche et développement.



68. Liaisons de données véhicule - infrastructure

Description

L'avènement des systèmes de transport intelligents, qui contribueront à améliorer simultanément le niveau de sécurité, la fluidité du trafic, et l'efficacité énergétique repose en grande partie sur la transmission de flux de données entre les véhicules et les infrastructures :

- à grande distance (du kilomètre à quelques centaines de kilomètres) : l'objectif est la gestion du trafic pour, par exemple, assurer la sécurité du transport aérien, optimiser la gestion des flottes de véhicules routiers commerciaux, permettre une exploitation interopérable des corridors ferroviaires européens, informer les usagers des transports en commun ;

- à moyenne distance (de 10 mètres à quelques centaines de mètres) ; il s'agit de transmettre une information d'ordre « tactique », c'est-à-dire :

- dans le transport terrestre, informer le véhicule en amont d'un accident ou d'un véhicule immobilisé, afin que le conducteur adapte sa vitesse ou sa trajectoire ;

- dans le transport aéronautique, aider à l'atterrissage de précision ou de guidage au sol ;

- à courte distance (de quelques centimètres à quelques mètres) : essentiellement dans le transport routier, les signaux émis par l'infrastructure vers le véhicule apportent des fonctions de guidage ou d'aide à la conduite, avec une constante de temps de quelques fractions de seconde.

Ces flux de données viennent compléter les communications radio traditionnelles, principal mode de transmission utilisé à l'heure actuelle. Au niveau du transport aérien, des liaisons de données dans les deux sens, permettant d'échanger des informations écrites concernant la navigation de l'appareil, sont

d'ores et déjà en place au niveau commercial.

Le développement des liaisons de données est indissociable des évolutions en matière de systèmes embarqués (capteurs de fonctionnement, de navigation, de gestion...) et des systèmes sur l'infrastructure (traitement des données, surveillance, communication, outils d'aide à la décision). Au-delà de cette intégration, les liaisons de données doivent également être mises au point en considérant les conditions d'interopérabilité au niveau régional ou mondial.

Dans le transport aérien, l'intégrité des données échangées est un enjeu technique majeur. Pour le transport routier, la capacité des technologies à être déployées à grande échelle, à un coût raisonnable, doit être recherchée. Par ailleurs, ces technologies doivent être suffisamment évolutives pour permettre le traitement des informations qui seront délivrées par les futurs systèmes embarqués.

Enjeux, Impact

Les enjeux traités par ces technologies sont plus largement les enjeux des systèmes de transports intelligents : amélioration de la sécurité, gestion optimisée des flux de véhicules pour des impacts environnementaux réduits et une compétitivité accrue des transports.

L'enjeu est particulièrement important dans le domaine du transport aérien, pour résoudre les problèmes de capacité que connaît la gestion du trafic ATM (*Air Traffic Management*). Ces problèmes s'expriment notamment en termes d'espace aérien et de procédures, de diversité des systèmes et des contraintes humaines en vol ou au sol. Les liaisons de données véhicule-infrastructure

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

doivent participer à l'intégration, dans un même espace aérien, de la gestion des flux de circulation aérienne, des aéroports, des centres de contrôle du trafic aérien, des avions et des centres d'exploitation des lignes aériennes.

Dans le transport ferroviaire, l'enjeu est le développement des réseaux européens pour améliorer la compétitivité et la sécurité du transport ferroviaire. La réponse à cet enjeu passe, notamment, par le déploiement d'ERTMS (*European Rail Traffic Management System*). L'introduction d'un système de signalisation, de contrôle commande et de communication harmonisé va faciliter l'exploitation internationale des services ferroviaires, permettre l'utilisation optimale de la capacité des lignes et assurer un haut degré de sécurité et de fiabilité.

Pour les acteurs français, un autre enjeu réside dans la participation aux travaux pré-normatifs, afin de promouvoir les technologies développées. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine des transports terrestres où l'élaboration des normes est en cours.

Marché

Tous les domaines des transports sont concernés, les applications apparaissant particulièrement critiques dans les domaines aéronautiques et routiers.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : optique, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), informatique, automatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, transports, spatial - armement, BTP.

■ Pôles de compétitivité : Images et réseaux (Bretagne), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Génie civil ouest (Pays

de la Loire), Elopsys (Limousin et Midi-Pyrénées), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Ville et mobilité (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes), ■ Liens avec (technologies) : infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Eseo (Angers), Inrets, Inria, Livic (Inrets-LCPC), Onera, Service technique de la navigation aérienne.

Industriels : Airbus, Alstom, Thales.

Pour les transports terrestres les problématiques de liaisons de données véhicule-infrastructure sont notamment prises en compte dans le cadre des travaux du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - www.predit.prd.fr).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Pour le transport aérien, ces problématiques sont gérées au niveau international ; des discussions ont notamment lieu dans le cadre de l'OACI (Organisation de l'aviation civile internationale - www.icao.int).

Commentaires

Au niveau européen, Ertico (*Intelligent Transport Systems & Services* - www.ertico.com) est chargé de la promotion des systèmes de transports routiers intelligents, dont les liaisons de données sont une composante.

La dimension européenne du développement et de la mise en œuvre de ces technologies est indispensable pour constituer des normes applicables à l'échelle mondiale. Le système ERTMS (*European Rail Traffic Management System* - www.ertms.com) dans le domaine ferroviaire apparaît de ce point de vue un exemple de succès dans l'établissement d'un standard international.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile, construction navale, construction de matériel ferroviaire roulant, construction aéronautique et spatiale, autres véhicules, industries des équipements électriques et électroniques, fabrication de matériel électrique, fabrication de composants électroniques, services de transports.



69. Systèmes aériens automatisés

Description

Le développement de services effectués au moyen de petits véhicules aériens automatisés et autonomes repose sur la capacité de contrôle du vol de ces « drones » en environnement hostile et perturbé. Cette capacité passe par une maîtrise de l'aéromécanique de ces engins et des lois de contrôle associées, tout en prenant en compte l'intervention humaine possible d'un opérateur à un niveau qui reste à définir en fonction des véhicules et des applications considérés.

Les verrous au déploiement de cette technologie sont d'ordre :

- réglementaire : la circulation des véhicules aériens, quelle que soit leur taille, est étroitement encadrée. Les industriels et opérateurs potentiels d'un côté, les autorités de l'autre, attendent que l'autre partie prenne l'initiative ;
- technique : des points restent à améliorer comme la transmission des données, la discrétion des véhicules, la gestion des situations dégradées...

Enjeux, Impact

En autorisant le déplacement de charges utiles (capteurs, colis...) dans des véhicules dimensionnés au plus juste (et non pas dans des véhicules dimensionnés pour transporter un pilote en plus de la charge utile), cette technologie contribuera globalement à l'efficacité énergétique de l'activité humaine.

Sur le plan national et européen, elle contribuera à relever le défi de la compétitivité et de l'emploi. Certains experts affirment que le marché des drones apportera à l'industrie aéronautique une rupture comparable à celle de la téléphonie mobile pour l'industrie des télécommunications.

La France a pris du retard dans la technologie

des drones militaires de tailles moyenne et grande (où les systèmes israéliens et américains dominant). Elle ne doit pas manquer le marché des drones civils de « petite taille » très prometteur : le tissu industriel concerné est large. L'impact sur la compétitivité et l'emploi est attendu à l'horizon 2015.

Marché

Au-delà des applications militaires, le potentiel du drone civil est gigantesque, ses applications étant extrêmement nombreuses :

- surveillance de lieux sensibles, surveillance d'urgence (avalanches, incendies de forêt...), surveillance de cultures, du trafic routier, inspection des ouvrages d'art... ;
- intervention en milieux dangereux et/ou pollués, missions dangereuses... ;
- épandage agricole, largage de vivres en zone de conflit, transport de petits colis... ;
- télécommunications.

Le marché mondial des drones représentait 2,4 Md\$ en 2000 et devrait atteindre 5,6 Md\$ en 2007, puis dépasser 10 Md\$ en 2010. Ce sera alors un des secteurs les plus dynamiques de l'industrie aérospatiale, à condition bien sûr que la réglementation évolue dans le sens de leur intégration dans la circulation aérienne.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, optique, énergétique, mécanique des fluides, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux, informatique, automatique, traitement du signal, électronique.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, optique, analyse, mesure et contrôle, traitements de surface, procédés techniques, appareils agricoles et alimenta-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

tion, environnement - pollution, transports, spatial - armement.

■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Mer, sécurité et sûreté (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Gestion des risques et vulnérabilités des territoires, System@tic (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; positionnement et horodatage ultraprécis ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français
Centres de compétences : Onera, Insa (Strasbourg), Laboratoire d'automatique de Grenoble, Laboratoire des systèmes complexes (Evry).

Industriels : EADS, Safran, Thales, Dassault.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Alenia Aeronautica (Italie), IAI (Israel Aircraft Industries), Micropilot (Canada), Schiebel (Allemagne), General Atomics (États-Unis), Sikorsky (États-Unis), Yamaha (Japon).

Commentaires

Le marché des drones civils devrait connaître une véritable explosion dès lors que les premières règles de navigabilité verront le jour. En Europe, le programme Ucare vise à publier des recommandations pour établir ces réglementations à l'échelle européenne. Pour en savoir plus sur ce programme : www.euro-uvs.org.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche ; commerce de gros, intermédiaires ; commerce de détail ; services de transports ; postes et télécommunications ; services aux entreprises.
--



70. Positionnement et horodatage ultraprécis

Description

À partir de signaux émis par une (ou plusieurs) constellation de satellites, un récepteur effectue un calcul de triangulation qui permet de déduire la position de l'antenne. Reposant sur ce principe, le système militaire américain GPS est opérationnel et accessible au public depuis plusieurs années. Malgré le développement de nombreux équipements et services (chacun peut aujourd'hui acquérir un récepteur GPS pour quelques dizaines d'euros), les garanties de qualité et de continuité de service du GPS sont insuffisantes pour des applications critiques (par exemple, atterrissage de précision des avions). Dès 2005, le système Egnos (*European Geostationary Navigation Overlay Service* ou système européen de navigation par recouvrement géostationnaire) offre un service amélioré, en utilisant les signaux GPS et Glonass (système russe). Il se compose de plusieurs charges utiles de navigation installées sur des satellites en orbite géostationnaire et d'un réseau terrestre comprenant 34 stations de positionnement et quatre centres de contrôle. La constellation de satellites Galileo, opérationnelle à l'horizon 2010, proposera trois fonctionnalités, dont l'utilisation individuelle ou combinée ouvre un vaste champ d'applications. Il s'agit de positionnement 3D décimétrique, voire centimétrique, d'horodatage ultraprécis (niveau de performance d'une horloge atomique), d'interopérabilité avec les normes télécoms (GSM, UMTS...).

Les terminaux, qui reçoivent le signal émis par les satellites et le traitent pour donner à l'utilisateur une information utile, intègrent de nombreuses technologies électroniques, logicielles (traitement du signal, cartographie, guidage...) et des fonctions de télécommunication.

Enjeux, Impact

De par la multiplicité des applications envisageables, cette technologie répond à de nombreux enjeux socio-économiques : sécurité des personnes et des échanges, réduction de la consommation d'énergie (par l'optimisation des trajectoires des véhicules), mobilité des personnes handicapées, etc.

En outre, il ne paraît pas acceptable que l'Europe dépende durablement de systèmes et de normes américains pour des applications critiques.

Par ailleurs, selon des études réalisées pour la Commission européenne, Galileo devrait créer, à partir de 2007, quelque 140 000 emplois en Europe.

Marché

Le marché de services et d'équipements qui découlera de Galileo est estimé à environ 9 Md€ par an. Plus largement, la Commission européenne retient que les marchés et les applications mondiaux pour la navigation par satellite sont en très forte croissance, et pourraient représenter 140 Md€ de ventes à l'horizon 2015. Il y a donc une véritable opportunité à saisir pour les industriels et les prestataires de service pour conquérir des positions de choix sur ce vaste marché.

Au-delà de la constellation de satellites, déjà commandée, les marchés accessibles aux entreprises, dont les PME, sont essentiellement :

- le marché des terminaux (matériel, logiciel) ;
- le marché des services associés : aide au voyage, sécurité (*tracking...*), informations trafic...

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : optique, sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère), astronomie, astrophysique, mécanique, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, économie et gestion, géographie et aménagement.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, semi-conducteurs, moteurs - pompes - turbines, composants mécaniques, transports, spatial - armement.

■ Pôles de compétitivité : Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : travaux d'infrastructures furtifs ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; systèmes aériens automatisés ; gestion des flux de véhicules ; ingénierie des systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Les acteurs français impliqués dans les utilisations de l'espace sont notamment rassemblés au sein de l'association I-Space (www.i-space.fr). L'initiative Cecile (Centre d'expertise et de compétences industrielles pour le développement des applications de la localisation et de l'environnement utilisant les satellites) rassemble également des acteurs du secteur (polestar.corporate.online.fr/presentcecile.htm).

Centres de compétences : Cnes, IGN...

Industriels : EADS-Astrium, Esri France, Loxane, Metod Localisation, Mobiloc (Groupe TDF), Novacom Services, Saphymo, Sercel, Thales IS, Thales Navigation... Les industriels concernés sont aussi : les opérateurs de transports (Air France, SNCF...), les constructeurs et équipementiers de véhicules (Airbus, Alstom, PSA Peugeot Citroën, Renault...).

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Avmap (Italie), Garmin (États-Unis), Navteq (États-Unis), Navman (Nouvelle-Zélande), Teletlas (Pays-Bas)...

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application





71. Gestion des flux de véhicules

Description

Avec l'intensification des échanges de biens et des déplacements de personnes, les parties prenantes aux systèmes de transports se trouvent confrontées aux problèmes complexes de l'utilisation de ressources limitées, les infrastructures de transport au sens large : routes, voies ferrées, voies navigables, espace aérien...

L'amélioration des méthodes et outils de gestion des flux de transport permettra d'apporter des solutions globales ou segmentées aux problèmes suivants (liste non exhaustive) :

- comment rendre plus attractifs les transports en commun en réduisant les temps de parcours ?
- comment résorber l'insupportable congestion des centres urbains et de leurs axes d'accès ?
- comment éviter de doubler ou d'élargir un axe routier ou autoroutier, pour des besoins de trafic croissants ?
- comment faire passer plus de trains en toute sécurité sur un axe ferroviaire donné ?
- quelles nouvelles organisation et exploitation de l'espace aérien faut-il mettre en place, pour faire face à l'augmentation du trafic ?

Cette technologie s'applique aux véhicules et aux « charges utiles » : marchandises, personnes, et permet d'optimiser le système en fonction d'un ensemble de critères (minimisation du temps de transport, réduction de la consommation de carburant, limitation des « ruptures de charge » ...).

La conception, puis le déploiement et l'exploitation des systèmes de gestion de flux de transports nécessitent :

- en amont, une approche résolument pluridisciplinaire à travers des analyses reposant sur les « sciences de l'homme » et permet-

tant d'identifier les besoins sociétaux et leur évolution probable, ainsi que l'utilité et l'acceptabilité des dispositifs envisagés par les acteurs (conducteurs, passagers...) et de proposer une organisation globale du système ;

- une bonne maîtrise de l'algorithmie (optimisation globale, gestion des trajectoires individuelles...);
- des briques technologiques de plus en plus performantes et miniaturisées (capteurs, composants électroniques, ordinateurs, communications sécurisées...) intégrées dans les dispositifs de gestion des flux de transports.

Enjeux, Impact

L'enjeu du développement des technologies de gestion des flux est tout simplement la durabilité des systèmes de transport. Les pouvoirs publics de la plupart des pays ont pris conscience de la gravité de la situation et des conséquences économiques et environnementales désastreuses des dysfonctionnements actuels.

Dans son Livre blanc sur les transports (2001) la Commission européenne retient que « la congestion fait courir le risque sérieux d'une perte de compétitivité de l'économie européenne ». Les impacts des congestions des systèmes de transport peuvent être en partie évalués à la lecture des éléments proposés par la Commission :

- 10 % du réseau routier européen serait quotidiennement affecté par des encombrements ;
- les retards dans le transport aérien engendreraient une surconsommation équivalente à environ 6 % de la consommation annuelle de carburant ;
- les coûts dus à la congestion du trafic rou-

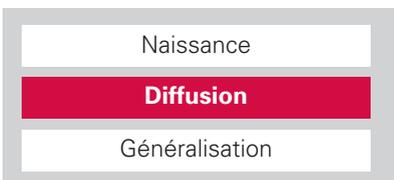
Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Transport

266

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



tier en Europe devraient atteindre 80 Md€ par an en 2010, soit environ 1 % du PIB communautaire.

Au niveau national, deux enjeux apparaissent. En premier lieu, l'attractivité de la France bénéficiera d'une meilleure performance de ses infrastructures de transport. Ensuite, plusieurs acteurs français sont très bien positionnés sur les marchés du transport, et verront leur compétitivité renforcée par la maîtrise de ces technologies.

Marché

Cette technologie s'applique à tous les modes de transport, avec des spécificités propres à chaque mode.

L'espace aérien possède naturellement trois dimensions ; pourtant son organisation est actuellement basée sur des « couloirs aériens » et des points de passage obligés qui créent des goulets d'étranglement et limitent son potentiel. Une meilleure gestion des flux aériens passe par une refonte profonde de cette organisation : unification du ciel européen, utilisation de l'ensemble de l'espace, effacement progressif des opérateurs humains (contrôleurs, pilotes) des opérations temps réel, modification des procédures d'approche et de décollage. Sur le plan technique, les communications directes des ordinateurs de contrôle aérien aux pilotes automatiques, l'utilisation plus poussée des systèmes de navigation satellitaires, sont quelques axes de travail.

Dans le domaine ferroviaire, il s'agit de densifier l'utilisation des infrastructures, pour désengorger les axes routiers. Sur le plan européen, l'avènement de liaisons transeuropéennes bute sur la question de l'intermodalité.

Les routes sont aujourd'hui perçues comme un espace de liberté pour les conducteurs. Cette liberté « coûte » 5 000 morts en France, et la congestion récurrente de nombreux axes routiers et autoroutiers. La gestion des flux de véhicules routiers est limitée à des informations et des recommandations (radio, panneaux à messages variables) que le conducteur est libre de ne pas suivre. La gestion des flux de véhicules routiers passera par un véritable « contrôle-commande » entre l'infrastructure routière (ou un centre de contrôle) et les véhicules.

L'intermodalité, aujourd'hui handicapée par les « ruptures de charge » inhérentes à chaque changement de mode de transport, bénéficiera également des technologies de gestion des flux.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : neurosciences, optique, génie civil, informatique, automatique, traitement du signal, électronique, optronique, mathématiques et leurs applications, sciences du langage, psychologie, sociologie, démographie, géographie et aménagement.

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

■ Pôles de compétitivité : Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes), Vestapolis (Île-de-France), Génie civil ouest (Pays de la Loire), I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie), System@tic (Île-de-France), Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté), Ville et mobilité (Île-de-France), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Logistique Seine Normandie (Haute-Normandie)

■ Liens avec (technologies) : infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; systèmes aériens automatisés ; positionnement et horodatage ultraprécis ; ingénierie des systèmes embarqués ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Des travaux de recherche sont notamment menés dans le cadre du programme de recherche Predit (Programme national de recherche et d'innovation dans les transports terrestres - www.predit.prd.fr).

Centres de compétences : ENPC, Inrets, LCPC, RFF, Service technique de l'aviation civile, université de Marne-la-Vallée.

Industriels : Air France, Citilog, Connex, Dynalogic, Egis/Isis, Eurodécision, IER, Infotrafic, Médiamobile, RATP, SNCF, groupe Snef.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : les opérateurs de transport et de livraison, les industriels des technologies de génie civil, les grandes métropoles... sont concernés

par le développement et la mise en œuvre de ces technologies.

Commentaires

Les problématiques de gestion des flux de véhicules doivent s'appréhender à différents niveaux : local, régional, national et européen. Sur ce dernier point, les enjeux sont, en particulier, de disposer d'une taille critique suffisante pour s'affirmer sur la scène mon-

diale (transport aérien, Galileo...), de supprimer les goulets d'étranglements aux frontières et d'assurer l'interopérabilité des réseaux (notamment ferroviaires).

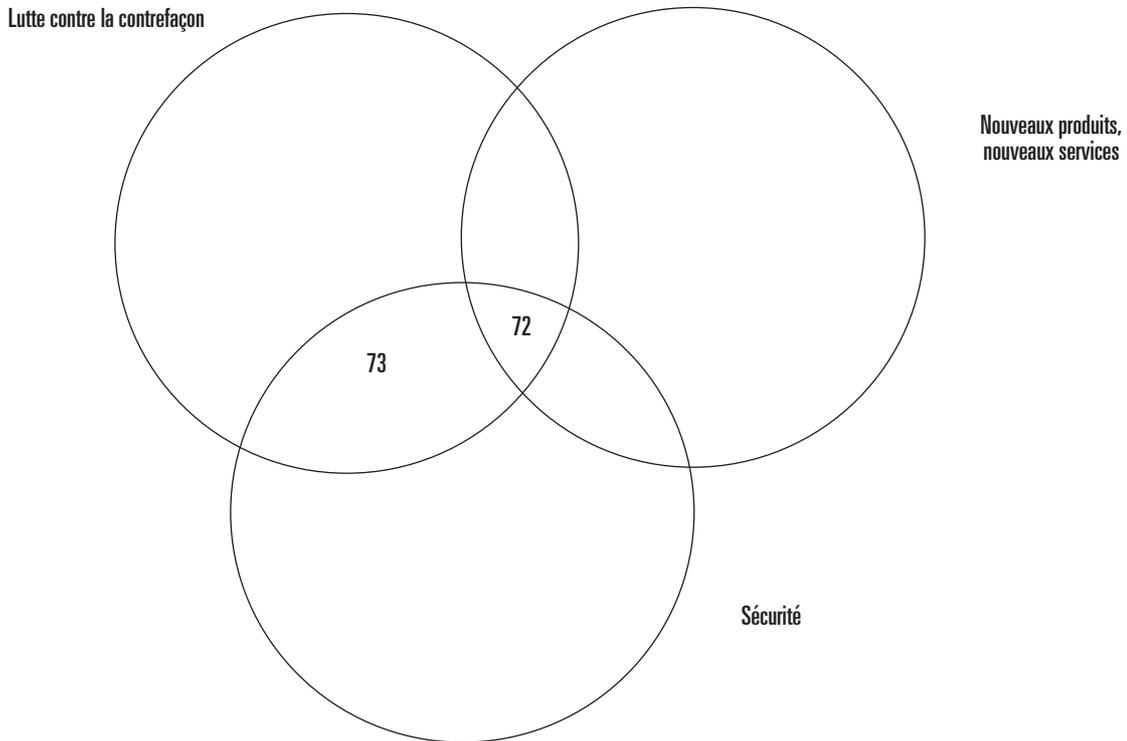
La coopération franco-allemande *Deufrako* (www.deufrako.org) est un exemple de mise en commun de compétences et de prise en compte de problématiques transnationales sur les transports.



Distribution - Consommation

- 72 Technologies d'authentification
- 73 Traçabilité

Des grands enjeux aux technologies clés



Le secteur de la distribution et de la consommation

Le contexte

Le secteur de la distribution et de la consommation correspond à ce que l'on peut appeler plus généralement les fonctions supports. Ce secteur recouvre plusieurs types d'activités dont quelques-uns sont présentés ci-après.

Banque, assurance et services financiers

Les services financiers produisent près de 7 % de la valeur ajoutée totale des économies européennes. Ils emploient 3,4 millions de personnes dans l'UE15. L'Allemagne compte pour 24 % de cette valeur ajoutée, le Royaume-Uni pour 17 % et la France et l'Italie pour 15 % chacune.

Le secteur de l'assurance a été ébranlé par les attentats et les catastrophes naturelles au début des années 2000. Il emploie 1,2 million de personnes dans

l'UE15. C'est au Royaume-Uni qu'il y a le plus d'entreprises d'assurance-vie (46 % du marché européen), et en Allemagne pour les autres types d'assurance (35 % du marché européen). Les assureurs « mixtes » sont très nombreux en Espagne et en France (36 % de ce marché), et les réassureurs au Luxembourg.

Dans le domaine de l'assurance, la France est un marché atypique puisque les mutuelles d'assurance sont dominantes. Par ailleurs les fonds de pension privés y sont moins développés qu'au Royaume-Uni, par exemple.

Les métiers de la banque et de l'assu-

rance correspondent à trois types de risques liés à la personne, aux activités économiques, aux biens. Une des caractéristiques du secteur de la banque-assurance est que les flux monétaires, d'informations et de matières, qui sont séparés dans l'industrie, sont confondus. Une banque de grande taille engage généralement 10 % de son CA en dépenses technologiques (matériel informatique, licences, services IT...). L'informatique est pour une banque ce que la chaîne de production est pour un constructeur automobile. Dans la banque, le cycle des technologies utilisées est d'environ cinq ans (c'est, par exemple, le temps de renouvellement du parc de cartes de crédit).

Enjeux et tendances dans les domaines de la banque, de l'assurance et des services financiers

Ces secteurs ont connu de très importants mouvements de concentration dans les dernières années, qui ne sont probablement pas encore achevés.

Les produits financiers destinés aux particuliers ou aux entreprises se sont multipliés ces dernières années. Les marchés financiers européens sont encore très fragmentés, leur intégration fait l'objet de plusieurs mesures de la Commission européenne. Cette intégration est rendue indispensable par le développement du commerce électronique. La banque en ligne (par téléphone ou Internet) représente désormais 10 % des transactions. Le nombre d'agences diminue, tandis que les distributeurs automatiques d'argent se multiplient.

Les banques subissent la concurrence des marchés financiers. Le vieillissement de la population et les incertitudes pesant sur le financement des retraites futures jouent en faveur du développement des fonds de pension. On estime

qu'un quart de la population active européenne est couverte par une retraite complémentaire.

Le secteur financier allie deux visions du monde, le global et l'hyper-local :

- rien n'est plus facile à transférer d'un bout à l'autre de la planète que l'argent ;
 - rien n'est moins délocalisable que le service financier de base (en particulier pour des raisons juridiques et fiscales).
- Pour le secteur financier, le microcrédit et le microfinancement ne sont pas des activités clés dans la mesure où, aujourd'hui, les coûts de gestion sont trop élevés pour que les opérations soient rentables. Chez certains acteurs, ce sont des retraités qui étudient les dossiers. Cela peut freiner le développement des projets de microentreprises. Des avancées technologiques (comme le traitement automatisé) pourraient permettre, peut-être, de rentabiliser ces activités.

Pour le secteur financier, un enjeu stratégique réside dans la gestion des systèmes de sécurité, en particulier des sauvegardes et de l'organisation de « sites de repli » (qui reprennent les activités d'un site indisponible en mettant un ordre de priorité sur les activités critiques). Dans le même registre, la sécurité des échanges d'information est essentiel : il faut répondre aux « vols d'identité » et améliorer toujours la cryptographie.

Dans le domaine bancaire, les exigences de sécurité se déclinent comme suit :

- la disponibilité de la ressource ;
- la confidentialité de la transaction ;
- l'intégrité de la transaction ;
- le contrôle et la preuve de la ressource et de la transaction.

Tout l'essor du commerce électronique dépendra du développement de procédures sûres de non-répudiation des transactions électroniques. Aujourd'hui,

dans un échange entre un portail sécurisé et un navigateur web, il n'y a pas de certification permettant le « rejeu »⁽¹⁾ de la transaction.

À plus long terme, un enjeu risque de devenir majeur pour le secteur, celui de la caractérisation génétique des individus pour la sélection des risques. Si ces technologies sont disponibles, les banques et les assurances pourraient être tentées de l'utiliser. Ces méthodes donneraient un avantage compétitif fort, mais on doit s'interroger sur la dimension éthique et le choix de société que cela implique, et donc sur les aspects législatifs associés.

Enfin, dans ce secteur, l'environnement fiscal, le droit du travail et la protection du consommateur sont des enjeux très structurants.

Conseil et études en R&D externalisée, ingénierie et architecture

En 2001, la valeur ajoutée du secteur de la R&D externalisée était de 11,9 Md€ au niveau européen. Le Royaume-Uni en génèreait 3,8 Md€, la France, en seconde position, 1,7 Md€. À la même date, ce secteur employait plus de 300 000 personnes dans l'UE 15 (dont environ 30 000 en France).

Toujours en 2001, le secteur des « activités d'ingénierie, d'architecture de test et d'analyse » représentait, quant à lui, près d'un cinquième de la valeur ajoutée de toutes les « fonctions support », avec un montant de 101 Md€ pour l'UE 25 et de 98 Md€ pour l'UE 15. L'Allemagne et le Royaume-Uni sont les pays qui contribuent le plus à cette activité avec une valeur générée à peu près équivalente

(1) Les attaques par « rejeu » sont des attaques consistant à intercepter des paquets de données et à les rejouer, c'est-à-dire les retransmettre tels quels au serveur destinataire. Ainsi, selon le contexte, le pirate peut bénéficier des droits de l'utilisateur.

d'environ 25 Md€, tandis que celle générée par la France, en troisième position européenne, est de 13 Md€. 2,4 millions de personnes sont employées dans ce secteur pour l'UE 25 et 2 millions dans l'UE 15. La croissance de la valeur ajoutée dans ce secteur est particulièrement forte et ininterrompue depuis 1997. Les clients sont principalement les entreprises.

Les frontières entre ces deux rubriques statistiques sont en réalité assez floues. Le premier groupe européen dans cette activité est français (Altran), mais les pays du nord de l'Europe ont quelques « champions » : WS Atkins (Royaume-Uni), Arup Group (Royaume-Uni), Arcadis Group (Pays-Bas), Fugro NV (Pays-Bas).

Enjeux et tendances dans les domaines du conseil et études en R&D, de l'ingénierie et de l'architecture

La complexité croissante des produits et processus de production, plus généralement l'évolution des économies occidentales vers des « économies fondées sur la connaissance », devrait contribuer à la croissance de ce secteur sur des sujets de plus en plus spécifiques. La sous-traitance d'ingénierie ou de R&D doit prendre en compte, au-delà des aspects purement techniques, les enjeux de propriété intellectuelle.

En France, la croissance de ce secteur peut se heurter, dans certains domaines, à la concurrence des laboratoires publics de recherche qui doivent se mettre en quête de contrats privés pour financer une partie de leur fonctionnement mais ne facturent pas systématiquement leurs coûts complets. Cette concurrence reste, cependant, peu importante. Le point faible de la France en la matière est l'insuffisance du transfert de technologies entre les laboratoi-

res académiques et le tissu industriel. Depuis plusieurs années, ce point a largement été abordé par de nombreux experts, et dernièrement dans les résultats de l'opération FutuRis.

Les activités de recherche-développement commencent aussi à être délocalisées. Les enjeux « technologiques » dans ce domaine d'activité sont en général liés à la créativité et à la production de connaissance, ainsi les outils informatiques de recherche « intelligente », de mise en réseau et de base de données sont de première importance. La gestion des systèmes complexes et la capacité d'intégration peuvent être des avantages compétitifs importants.

Services de sécurité

La valeur ajoutée des services de sécurité européens est estimée à 16,7 Md€ en 2001. Le Royaume-Uni arrivait en tête avec une VA de 4,3 Md€, suivi par la France (3 Md€) et l'Italie (1,8 Md€). L'emploi dans l'UE 25 était de 869 000 personnes, dont 647 000 dans l'UE 15. En France, le nombre d'employés du secteur de la sécurité privée est proche de celui des agents publics de police⁽²⁾.

Enjeux et tendances dans le domaine des services de sécurité

Il faut tout d'abord souligner que l'expression de marché privé de la sécurité recouvre de plus en plus de missions différentes : surveillance humaine et électronique, contrôle des accès et obstacle à l'intrusion, investigation, transport de fonds, protection des expatriés, etc.

Depuis le 11 septembre 2001, les

(2) Aux États-Unis, le ratio est de huit agents privés pour un policier public. Un quart du marché privé de la sécurité provient de la commande publique.

dépenses privées de sécurité ont très fortement augmenté aux États-Unis. Elles étaient déjà évaluées à 40 Md\$ par an dans ce pays, en 1999. Selon certaines sources, le marché mondial de la protection contre le terrorisme serait de 100 Md€. Selon certains auteurs, le seul marché américain de la sécurité privée - au sens large - pourrait atteindre ce chiffre dès 2008. Le dynamisme des technologies de sécurité est manifeste dans trois secteurs :

- les systèmes d'alarme et de détection (détecteurs à infrarouge, à micro-ondes, à ultrasons, détecteurs de métaux, détecteurs électromagnétiques, étiquettes électroniques, détecteurs de drogues, centrales d'alarmes) ;
- les systèmes de télésurveillance (TVCF, caméras de surveillance, vidéosurveillance, caméras cachées, centrales de surveillance) ;
- les systèmes de contrôle d'accès (identification par cartes magnétiques, cartes à puces, cartes de proximité, centrales de contrôle d'accès). L'évolution la plus remarquable du secteur est l'intégration de plus en plus poussée des équipements variés grâce aux technologies de la communication, de l'électronique et de l'informatique. Globalement, un enjeu important à ce sujet est lié aux aspects normatifs et aux standards.

La mondialisation pose le problème de la généralisation de la contrefaçon, qui ne concerne plus seulement les produits de mode mais tous les biens industriels, avec reproduction des marques et des systèmes d'authentification (les faux arrivent à être aussi bons que les vrais, voire meilleurs). Selon les chiffres disponibles - même s'ils sont sujets à caution - la contrefaçon représenterait 10 % du commerce international (contre 5 % en 2000). Dans cette problématique, il faut garder à l'esprit que traçabilité et authentification sont deux problè-

mes différents : dans le premier cas, des technologies simples et surtout peu coûteuses sont essentielles. Dans le deuxième cas, c'est la sécurité et la fiabilité qui sont primordiales.

On ne peut pas omettre, dans les activités liées à la sécurité, d'évoquer les techniques d'identification et d'authentification (cartes à puces et biométrie). Il semble peu probable de voir à court terme la concentration de tous les services en une seule carte. On peut même envisager de ne jamais avoir besoin de cette carte unique : au Japon, il sera très prochainement possible de régler des achats ou un stationnement avec son téléphone portable. À moyen terme, les caractéristiques biométriques permettront d'identifier un individu de manière univoque : les caractéristiques physiques serviront alors de clé d'accès (a priori) non falsifiable à un ensemble de bases de données (comptes bancaires, droits d'accès...).

Services de recrutement et de travail temporaire

Ce secteur dégage une valeur ajoutée de l'ordre de 70 Md€ dans l'UE 25, en augmentation soutenue depuis plusieurs années (en 2001, Royaume-Uni 20 Md€, France, 20 Md€), et emploi 2,6 millions de personnes dans l'UE 25.

Enjeux et tendances dans le domaine des services de recrutement et de travail temporaire

L'activité des services de recrutement et de travail temporaire a fortement augmenté du fait de la tendance à l'externalisation et de la demande de flexibilité des entreprises. L'intérim est souvent considéré comme la première étape avant l'embauche définitive. L'enjeu dans ce domaine est de mettre en rela-

tion la personne disponible avec les compétences requises et l'employeur. Ainsi, les systèmes d'information jouent un rôle de plus en plus important dans ce secteur en élargissant la zone géographique de prospection.

Le vieillissement démographique nous pousse à souligner qu'il convient de s'interroger sur le rôle des « seniors » dans la compétitivité, d'autant que les industries ont besoin d'un support en compétences. Un nouveau modèle d'organisation sociale est nécessaire : formation tout au long de la vie, missions temporaires confiées à des seniors, tout cela peut conduire rapidement à une réingénierie complète de la fonction RH (gestion des carrières).

En résumé, la fonction RH est une activité clé pour :

- la gestion des compétences, en particulier par l'utilisation de l'expérience des plus âgés ;
- la formation tout au long de la vie ;
- et plus généralement, l'amélioration de l'employabilité de la population.

Par ailleurs, cette fonction aura, peut-être, à traiter de la question du malaise et du mal-être croissant en entreprise. Le développement de la microentreprise et de l'entreprise en réseau peut faire partie des solutions. Le développement des services à domicile peut, quant à lui, permettre de créer de nombreux emplois.

Conseil (juridique, management, financier) et services comptables

La valeur ajoutée du secteur du conseil (juridique, management, financier) et des services comptables représente près de 220 Md€ dans l'UE 25 et l'emploi, 4 millions de personnes. Le Royaume-Uni, avec 60 Md€, représente 28 % de la VA européenne, suivi

par l'Italie (26,7 Md€) et la France (26,6 Md€). Plus de la moitié de la VA est réalisée par des petites et moyennes entreprises. Les enquêtes d'opinion et les études de marché représentent une valeur ajoutée de 7 Md€ dans l'UE 25 et emploient près de 200 000 personnes.

Les enjeux et les tendances dans les domaines du conseil et des services comptables

L'externalisation des services comptables est un mouvement de fond qui n'est peut-être pas terminé. De plus, la fonction comptable peut être en partie automatisée par les systèmes d'information (*workflows*). La délocalisation vers des pays à bas coût touche également ces services.

Commerce de gros et de détail

La valeur ajoutée se monte à 420 Md€ dans l'UE 25 et l'emploi à 9 M€. Le Royaume-Uni dégage une VA de 85 Md€, l'Allemagne de 72 Md€, et la France de 56 Md€. Les petites et moyennes entreprises représentent plus de la moitié de la VA européenne du secteur.

Intermédiaires entre les producteurs et les distributeurs, les grossistes sont soumis à une forte concurrence et doivent proposer des services de plus en plus sophistiqués, en utilisant par exemple l'échange de données électroniques avec leurs partenaires pour gérer les stocks (traçabilité...). De plus, les producteurs peuvent être tentés de vendre directement au consommateur : cette tendance est renforcée par l'essor du commerce électronique. L'efficacité logistique, d'une manière générale, est un enjeu majeur du secteur commercial.

Les enjeux et les tendances d'évolution dans le domaine du commerce de gros et de détail

Qu'il s'agisse du commerce de gros ou de détail, les enjeux peuvent se résumer en trois points :

- efficacité logistique ;
- traçabilité des produits ;
- authentification des produits.

L'adoption des nouvelles technologies permettra de contrôler automatiquement les stocks et les commandes et de répondre plus rapidement aux changements de préférences des consommateurs.

Dans ce domaine, le développement de technologie comme celle des puces RFID pourrait avoir des conséquences importantes. Rappelons que la technologie RFID (identification par radiofréquence) permet d'utiliser des étiquettes - ou « tags » - de petite taille pouvant être lues à distance par un détecteur, et donnant une identification (comme une sorte de code barre radio). L'étiquette est en fait une puce associée à une antenne, faisant office de transpondeur, qui envoie un code numérique stocké dans sa mémoire quand le signal radio du lecteur lui fournit l'énergie et le signal nécessaires. La première application a été de les implanter sur des objets à des fins d'inventaire pour une reconnaissance à distance (quelques dizaines de mètres) de ces objets, y compris par cargaison entière. Les spécialistes estiment généralement que le secteur économique où cette technologie est la plus mature est celui du suivi des produits le

long de la chaîne de production-distribution.

D'autres systèmes technologiques pourraient permettre une traçabilité plus fine pour les produits périssables (changement de couleur en cas de rupture dans la chaîne du froid, par exemple, ou en fonction du temps de stockage). Wal-Mart a équipé un de ses magasins aux États-Unis d'un système pilote qui permet aux chercheurs de Procter & Gamble de voir et suivre les clientes des cosmétiques du groupe via des lecteurs RFID cachés qui mettent en route des caméras de surveillance du magasin quand le produit de la marque est sorti du rayon. L'enseigne a demandé à ses 100 premiers fournisseurs de lui livrer leurs produits « tagués » à partir du 1^{er} janvier 2005.

Soulignons que si le RFID marche bien pour la logistique, il ne remplacera pas immédiatement les 500 milliards de codes barres en circulation. Le leader mondial des machines fabriquant les tags RFID est allemand (Mühlbauer AG). En France, le potentiel industriel réside plutôt du côté des « encarteurs » (Gemplus, Axalto - ex-Schlumberger Smart Cards...).

Le commerce électronique bouleverse également le secteur. Pour certains produits, les livres notamment, il devient courant. Cependant, le commerce électronique ne remplacera jamais totalement le commerce classique : dans beaucoup de cas, le problème de la livraison reste entier (horaires, fiabilité, sécurité...).

La « rurbanisation » et le mitage territorial modifient le rapport des consommateurs au commerce. Ainsi, le modèle français de l'hypermarché subit aujourd'hui une crise : certains experts prédisent sa disparition inéluctable à plus ou moins brève échéance. Selon ces experts, ce modèle économique serait plus un « accident de l'histoire » qu'un modèle d'avenir. À l'étranger son échec est relativement patent, et, en France, sa santé actuelle ne tient qu'à un environnement législatif et réglementaire favorable. Parmi les raisons de cet « essoufflement », la réduction de la taille moyenne des foyers ne rend pas nécessaire le modèle de « courses » en grandes quantités (chariots de 300 litres et plus). À cela s'ajoute le fait que le vieillissement de la population ne milite pas en faveur de grandes surfaces « intimidantes » et impersonnelles.

Le commerce de centre-ville compte pour 25 à 30 % du PIB du commerce en général. Il faut s'interroger sur les moyens pour les acheteurs de ramener leurs achats chez eux, notamment si l'on réduit l'utilisation des voitures particulières en centre-ville. Généralement, les transports en commun sont inadaptés au transport de marchandises, même de volumes réduits.

Parmi les évolutions possibles, il faut noter l'utilisation du téléphone portable qui pourrait devenir rapidement un véritable « outil commercial » : achat électronique, authentification, photographie de produits, comparaison de prix, publicité avec des géo-tags.

Distribution - Consommation



72. Technologies d'authentification

Description

Les technologies d'authentification permettent de lutter contre la contrefaçon des objets et la falsification des documents. Elles permettent également la reconnaissance des organismes vivants. Ces technologies sont complémentaires des technologies de traçabilité, telles que code barre, datamatrix, RFID (*Radio Frequency IDentification*) ... qui ne peuvent pas prétendre authentifier un produit.

La preuve de l'authenticité d'un produit vendu sous une marque ou un label ne peut être apportée que par une pièce probante ou un traceur intimement rattaché au produit et associé à la marque et à l'identifiant qui l'accompagne. Cet élément probant doit être incontestable. Il faut donc que l'homme, en tant qu'acteur potentiel de la contrefaçon, soit exclu du processus qui conduit à l'élaboration de cette preuve et en plus soit incapable de reproduire une telle preuve à l'identique. Les technologies d'authentification doivent concilier impossibilité pratique de reproduction et faisabilité de la mesure des caractéristiques.

On distingue deux grandes familles de technologies d'authentification :

- celles reposant sur des techniques d'analyse permettant d'accéder aux caractéristiques intrinsèques de l'objet ou de l'être vivant : techniques isotopiques (mesurant la quantité d'un isotope naturellement présent), biologie moléculaire, cristallographie, chromatographie en phase liquide ou gazeuse, spectroscopies (absorption atomique, ultraviolet...), fluorescence, etc. Certaines de ces techniques sont anciennes, mais la plupart sont en perpétuelle évolution, et les associations de ces techniques entre elles permettent d'aller de plus en plus loin

dans la finesse de l'analyse. À ces techniques se combinent celles permettant de remonter à la « signature » unique dans le cas des organismes vivants, le génome. Citons l'amplification génétique, permettant de recopier un fragment d'ADN grâce à une enzyme ou les techniques de criblage et de synthèse à haut débit ;

- les techniques de biométrie permettent également d'accéder à certaines caractéristiques intrinsèques de l'individu (alors que les papiers d'identité peuvent être volés ou falsifiés) : les empreintes digitales (connues depuis longtemps), la reconnaissance de formes d'organes caractéristiques (oreilles, mains, face), la cartographie thermique, la reconnaissance vocale ou olfactive, la reconnaissance de l'iris ou de la rétine sont envisagées à plus ou moins longue échéance.

Les technologies de marquage issues d'un processus chaotique paraissent également bien adaptées. Par exemple, le « code à bulles » (bulles autogénérées dans un polymère transparent) dont la signature est toujours unique (probabilité de reproduction 10-80) et n'est pas décidée par l'homme mais par un processus naturel. Associé à une base de données locale et/ou distante, le « code à bulles » est accessible à l'homme uniquement en lecture mais impossible en écriture.

Enjeux, Impact

La contrefaçon représenterait plus de 10 % du commerce mondial. Elle croît dix fois plus vite que les échanges internationaux, détruit des centaines de milliers d'emploi, et est à l'origine de dizaines de milliers de morts (faux médicaments, alcools frelatés, fausses pièces d'origine électrique, automobiles, aéronautiques). Elle devient la première industrie mondiale et touche tous les sec-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Distribution - Consommation

teurs d'activité. Si les contrefaçons diffusées sur le sol français et européen sont certes en augmentation modérée, il en est autrement des mêmes produits diffusés en Europe de l'Est, en Chine, en Afrique où ils représentent une part importante de l'économie. À une époque où les marchés de nos industries vont se situer de plus en plus à l'exportation vers ces pays, on mesure, à l'avance, les conséquences économiques désastreuses que ceci aura.

À un tel niveau, la contrefaçon n'est plus occasionnelle et ne touche pas que les produits de luxe. Elle s'adresse désormais à la production de masse et aux produits les plus complexes. Pour accéder aux marchés, les produits contrefaits doivent aussi satisfaire à des caractéristiques comparables à ceux des originaux (ordinateurs, téléphones portables, etc.). Nous passons progressivement d'une époque où la contrefaçon n'était qu'une pâle copie (en général vendue moins chère pour trouver acquéreur) qui tendait plutôt à « imiter » ou à « leurrer » un original en reprenant des parties de marques ou des appellations similaires, à une période où la contrefaçon doit être le plus possible parfaite et où il devient quasiment impossible de distinguer le vrai du faux. Il est même à prévoir que l'accélération de la mondialisation des échanges, avec l'externalisation et la délocalisation des centres de production, pourrait conduire à transformer les sous-traitants d'aujourd'hui en contrefacteurs de demain.

Les technologies d'identification permettent aussi de répondre aux exigences réglementaires. Elles doivent donc s'inscrire dans la chaîne de traçabilité pour répondre aux exigences accrues des consommateurs et des règlements européens (notamment 178/2002).

Marché

La demande du marché émane de trois types de donneurs d'ordres :

- le consommateur qui veut avoir les moyens de vérifier l'authenticité de ses achats : l'authentifiant permet au consommateur de vérifier lui-même l'authenticité du produit et d'avoir confiance dans l'utilisation des produits de consommation ;
- l'industriel, pour qui la contrefaçon est une concurrence déloyale. L'authentifiant étant

unique, il confère aux objets et aux documents une unicité incontestable permettant de remonter à l'origine de ceux-ci et d'en déduire leur histoire. L'authentifiant peut s'utiliser pour sécuriser les transports, comme une partie d'un système de scellés. Le scellé, dont la propriété essentielle est de ne pas être réutilisable, et l'authentifiant associé non reproductible permettent de sécuriser la fermeture des conteneurs en prouvant leur ouverture illicite. L'authentifiant étant un objet unique et non reproductible, il peut constituer une preuve tangible ;

- les États, dans leur mission de lutte contre les trafics, crimes et délits qui souhaitent :
 - assurer l'authentification et le contrôle des biens et des personnes ;
 - assurer la gestion et le contrôle des identités et des droits ;
 - contrôler, tracer et authentifier les informations ;
 - réduire les revenus des trafics des organisations criminelles.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, matériaux, optique, physique des constituants élémentaires, physique des milieux dilués, physique des milieux denses, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique, mathématiques et leurs applications, droit et sciences politiques.

■ Compétences technologiques : composants électriques, télécommunications, informatique, optique, chimie organique, traitements de surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques, imprimerie, procédés thermiques.

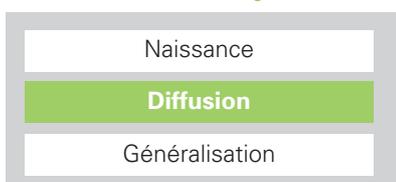
■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie), Minalogic (Rhône-Alpes), Prod'innov (Aquitaine), Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

■ Liens avec (technologies) : techniques de criblage et de synthèse à haut débit ; traçabilité.

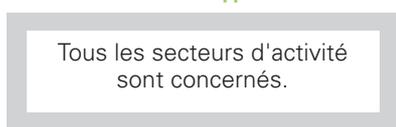
■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Inra, Inria.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Industriels : Arjo Wiggins, Hologram Industrie, Eurofins, Prooftag, Sicpa, Ecocert.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Authenix (États-Unis), Kurz (Allemagne), AOT (Royaume-Uni), IHMA (*International Hologram Manufacturers Association - ihma.org*),

...

Commentaires

La France est bien positionnée dans ce domaine, tant au niveau académique (Inra de Clermont-Ferrand notamment) qu'au niveau industriel (Ecocert est un leader européen du contrôle et de la certification pour les produits issus de l'agriculture biologique ; Eurofins est un leader mondial des analyses biologiques pour l'authentification). Dans ce domaine, les efforts de recherche sont à poursuivre.

Distribution - Consommation



73. Traçabilité

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

D'après la norme Iso 8402, la traçabilité est l'aptitude à retrouver l'historique ou la localisation d'un article ou d'une activité [...] au moyen d'une identification enregistrée. Il s'agit de pouvoir localiser un objet ou composant à tout moment du processus de production ou de distribution, et de pouvoir a posteriori reconstruire le parcours de chaque objet ou de chacun de ses composants les plus importants.

Dans les secteurs alimentaires et pharmaceutiques, la traçabilité est obligatoire réglementairement. Elle se développe pour des raisons de maîtrise de la qualité et de la chaîne logistique dans des domaines industriels tels que l'automobile, l'aéronautique, le textile et, d'une manière plus générale, les industries manufacturières.

Pour les industriels, les motivations sont d'ordre réglementaire mais aussi commercial. Suite aux différentes crises (dans le domaine alimentaire notamment : ESB, listéria...), la demande de la part des consommateurs en terme de traçabilité est de plus en plus forte. Elle est à mettre en relation avec leur quête d'authenticité. La mise en place de la traçabilité alimentaire permet de valoriser des produits de niche (produits biologiques, produits « terroir », produits garantis sans OGM, sans allergène). Dans ce domaine, la France est susceptible d'apporter une « dotation culturelle » riche.

Par ailleurs, la traçabilité permet, au-delà du lien de confiance établi avec le consommateur, de valoriser la chaîne de production et de distribution du produit. Elle apporte de la valeur ajoutée au produit.

Enfin, la traçabilité est devenue un élément clé de la gestion de la chaîne logistique, de la production à la distribution, et du suivi de la

qualité des objets industriels.

Les moyens techniques mis en place pour satisfaire les exigences réglementaires dans ce domaine sont variés :

- mise en place d'un étiquetage pertinent ;
- technologies RFID (pour « identification par radiofréquence ») ;
- systèmes de mesure ;
- techniques de marquage moléculaire ;
- techniques de marquage biologique ;
- marquage issu d'un processus chaotique.

Les technologies de gestion de base de données (relationnelles, distribuées) sont un des éléments clés à maîtriser pour résoudre les problèmes de traçabilité. L'ensemble de ces techniques a vu le jour suite aux progrès concomitants de plusieurs disciplines : la génomique, la microélectronique, les mathématiques, l'informatique. Les recherches sont à poursuivre pour trouver une réponse technique adaptée à chaque type de produit.

Enjeux, Impact

La traçabilité doit répondre aux exigences accrues des consommateurs et des règlements européens. Les enjeux de la maîtrise de cette technologie sont de trois ordres :

- il s'agit d'un réel élément de différenciation marketing car la demande d'informations de la part des consommateurs est très forte. Les données recueillies lors d'un sondage commandé par la Commission européenne et l'Office de lutte antifraudes (Olaf) illustrent ces propos : pour 46 % des personnes interrogées (56 % en France), la fraude et la tricherie mettant en jeu la sécurité alimentaire sont le 2^e sujet d'inquiétude. La diversification des origines des produits, résultant de la mondialisation des échanges, n'a fait qu'ajouter une source d'inquiétude supplémentaire, dans la mesure où se crée une cer-

Distribution - Consommation

taine « distance » avec l'origine du produit et où la contrefaçon se généralise dans tous les secteurs. Par ailleurs, la qualité et l'authenticité représentent 75 % des motivations d'achat des consommateurs français (Crédoc, Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie - 2003) ;

- il s'agit de répondre aux exigences réglementaires. Depuis le 1^{er} janvier 2005, la traçabilité des produits est obligatoire dans l'agroalimentaire (règlement 178/2202, applicable au niveau communautaire). Les industries agroalimentaires ont obligation d'investir dans de nouveaux processus pour favoriser la transparence et rendre l'information accessible ;
- il s'agit, enfin, de faciliter la gestion de la chaîne logistique (*supply chain*), afin de permettre d'une part un suivi strict de la qualité du produit, d'autre part une gestion fine des stocks de pièces détachées et sous-systèmes. Par ailleurs, en cas de défaillance d'un système ou de problème sanitaire, les industriels doivent pouvoir reconstruire le parcours complet de l'objet en question et de ses composants.

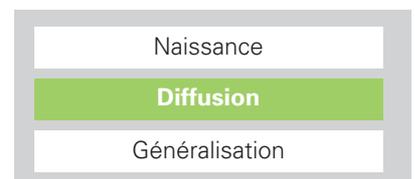
Marché

Le marché de la traçabilité est vaste. Les principaux secteurs d'application sont la pharmacie, l'agroalimentaire, l'automobile, l'aéronautique, le textile (lutte contre la contrefaçon). Ce marché est en croissance, stimulé par les nouvelles réglementations, notamment dans le domaine alimentaire. 15 000 entreprises françaises sont concernées aujourd'hui et le dynamisme de ce marché est important : sa croissance est de 15 % par an.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : biochimie, biologie moléculaire, biologie cellulaire, biologie des organismes, sciences médicales et alimentation, médecine et odontologie, chimie analytique, informatique, électronique, traitement du signal.
- Compétences technologiques : télécommunications, informatique, optique, analyse, mesure et contrôle, ingénierie médicale, biotechnologies, produits agricoles et alimentaires.
- Pôles de compétitivité : Aquatique (Nord-Pas-de-Calais), Vitagora (Bourgogne), Minalogic (Rhône-Alpes), Q@limes Agropolis (Languedoc-Roussillon).
- Liens avec (technologies) : génomique fonctionnelle à grande échelle ; alimentation pour le bien-être et la santé ; contrôle des allergies alimentaires ; RFID et cartes sans contact ; positionnement et horodatage ultra-précis.
- Principaux acteurs français
Centres de compétences : Cemagref (Clermont-Ferrand), CTCPA (Centre technique de la conservation des produits agricoles), Inra (Clermont-Ferrand).
Industriels : Agreentech, Alcan Packaging, Ask, Ecocert, Eurofins, Gemalto, Génome Express, Inside, Philips, ST Microelectronics, Tetra Pak...
- Pour en savoir plus : www.poletracabilite.com/default.cfm ; www.tracabilite.org
- Exemples d'acteurs dans le monde : Advanced ID (Canada), Sony (Japon), Texas Instruments (États-Unis)...

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application

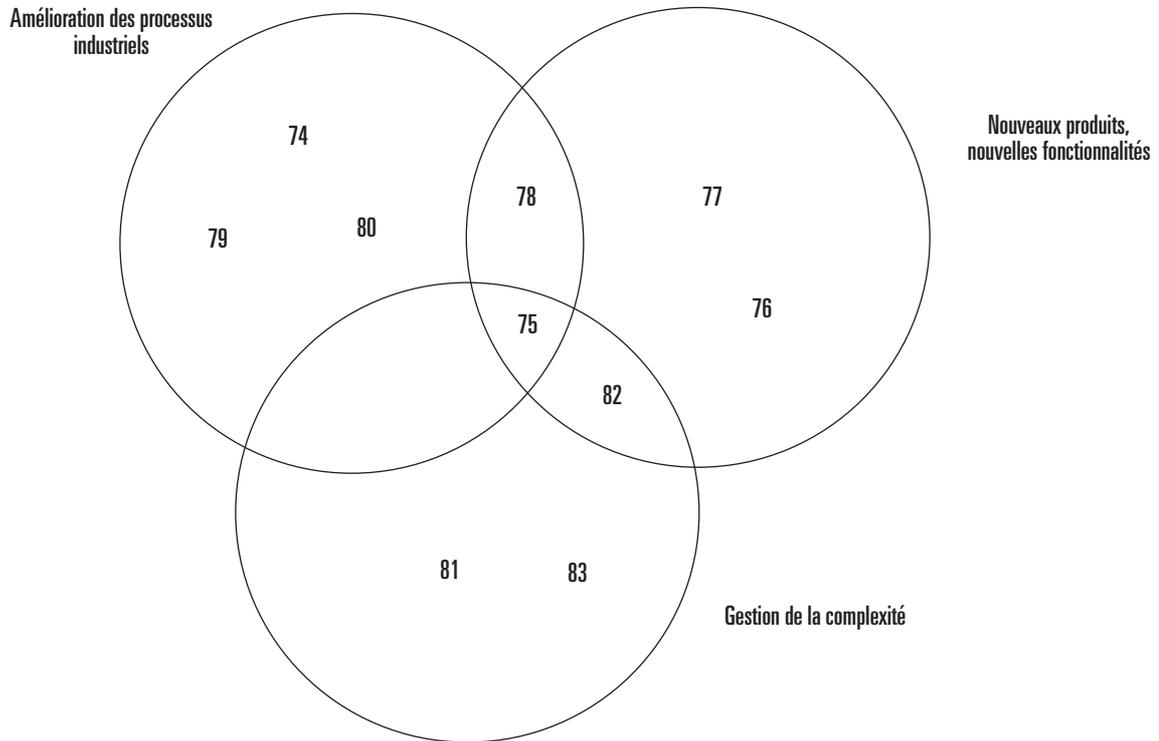
Agriculture, sylviculture, pêche ; industries agricoles et alimentaires ; habillement, cuir ; industrie pharmaceutique ; fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien ; industrie automobile ; construction aéronautique et spatiale ; industrie textile.



Technologies et méthodes de production

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

Des grands enjeux aux technologies clés



Le secteur des technologies et méthodes de production

Le contexte

Le secteur des équipements, process et méthodes de production est porteur d'enjeux majeurs pour la maintien et l'amélioration de la compétitivité et de l'activité des entreprises industrielles françaises. À l'heure où les coûts de main-d'œuvre sont un facteur d'attrac-

tivité pour les entreprises dans certains pays d'Europe de l'Est ou d'Asie, les atouts de l'industrie française résident d'une part dans les méthodes et outils permettant l'augmentation constante de la productivité, d'autre part dans ses capacités d'innovation et de production à haute valeur ajoutée.

Les domaines traités dans le cadre de cette monographie sont l'ensemble des secteurs de la productique, c'est-à-dire :

- l'instrumentation industrielle ;
- l'automatique ;
- les équipements électriques et électroniques ;
- les équipements de production (toutes industries) ;

- les procédés ;
- les méthodes d'amélioration de la productivité.

Par extension, la base de travail de l'étude étant la classification Eurostat, l'imagerie médicale et l'instrumentation médico-chirurgicale sont également abordées dans cette partie.

Les équipements, process et méthodes de production des différents secteurs d'activité ont en commun un certain nombre de déterminants détaillés dans cette section. Cependant, il est utile, à ce stade, d'exposer quelques données globales sur l'activité industrielle française.

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés ^(a) (milliers)	Entreprises ^(a) (variation ^(b))	Investissement ^(b)
Industries des biens de consommation	133,7	512,5	4 565 (- 4,3 %)	- 5,4 %
Industrie automobile	111,7	271,5	542 (- 0,9 %)	- 5,7 %
Industries des biens d'équipement	167,5	638,6	5 042 (- 3,2 %)	+ 1,2 %
Industries des biens intermédiaires	248,3	1 171,4	10 257 (- 2,9 %)	- 0,1 %
Ensemble de l'industrie (hors énergie)	631,2	2 593,9	20 406 (- 3,0 %)	- 2,0 %

(a) entreprises de 20 salariés et plus

(b) variation entre 2003 et 2004

Source : Chiffres clés des industries françaises (ensemble de l'industrie (hors énergie) - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

L'industrie française est constituée de plus de 20 000 entreprises de plus de vingt salariés, alors que le nombre des petites entreprises industrielles et de l'artisanat de production (PEIA, de 0 à 19 salariés) était estimé à 168 000 en 2001. Le secteur industriel, dans son ensemble, représente, en 2004, un chiffre d'affaires de 631 Md€.

Si le secteur industriel est une composante forte de l'activité et de l'emploi en

France, force est de constater, depuis plusieurs années, une tendance durable à la baisse des investissements industriels nécessaires au soutien de la croissance. Ce constat est en contradiction, depuis plusieurs années, avec les prévisions d'investissements affichées par les industriels. Les bénéfices réalisés par les grands groupes industriels servent en partie à assurer une croissance externe fondée sur l'acquisition de filia-

les hors du territoire français (26 Md€ au premier semestre 2005). Par ailleurs, les enquêtes de l'Insee révèlent que la plus grande partie des investissements industriels visent des gains de productivité et non un accroissement des capacités de production, qui sont globalement en sous-charge en 2005. Cette diminution de l'investissement a des conséquences immédiates sur le secteur des équipements industriels.

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés ^(a) (milliers)	Entreprises ^(a)
Machines de bureau et matériel informatique	13,5	26,4	65
Moteurs, génératrices et transformateurs électriques	3,7	22,1	161
Appareils d'émission et de transmission	14,0	45,3	156
Matériel d'imagerie médicale et de radiologie	1,2	2,8	11
Appareils médico-chirurgicaux	3,9	23,0	253
Équipement d'aide à la navigation	5,4	21,7	37
Instrumentation scientifique et technique	3,5	21,2	210
Équipement de contrôle des processus industriels	1,8	12,2	197
Total industries des équipements électriques et électroniques	47,0	174,9	1 089
Matériel électrique	22,0	115,5	565
Composants passifs et de condensateurs	2,6	6,5	77
Composants électroniques actifs	7,5	31,4	60
Assemblage de cartes électroniques pour compte de tiers	0,9	19,0	204
Total industries des composants électriques et électroniques	33,0	172,4	906
Total équipements et composants électriques et électroniques	80,0	347,3	1 997

(a) entreprises de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries françaises des équipements et composants électriques et électroniques - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés ^(a) (milliers)	Entreprises ^(a)
Éléments en métal pour la construction	5,7	36,9	609
Chaudronnerie, réservoirs métalliques, chaudières	7,3	56,0	882
Équipements mécaniques	12,9	60,0	652
Machines d'usage général	16,1	87,8	785
Machines agricoles	4,1	16,4	206
Machines-outils	1,8	11,0	159
Machine d'usage spécifique	9,3	50,6	627
Armes et munitions	2,6	11,8	17
Total équipements mécaniques	59,8	330,4	3 637

(a) entreprise de 20 salariés et plus

Source : Chiffres clés des industries françaises des équipements mécaniques - enquête annuelle entreprises 2004 (Sessi - juillet 2005)

Machines et équipements industriels

En Europe, le secteur des machines et équipements industriels représente une valeur ajoutée de 168 Md dans l'UE 25, soit près de 11 % de la valeur ajoutée industrielle. Il fournit des emplois à 3,6 millions de personnes. L'Allemagne domine le secteur en Europe avec plus du tiers de la valeur ajoutée créée (37,4 %), et plus de 50 % sur le seul segment des machines-outils. Cependant, on note que la production européenne de machines-outils diminue en moyenne de 1 % par an.

Le secteur des équipements industriels dédiés à la production est mal représenté dans l'industrie française. Ainsi, le secteur de la machine-outil n'est plus présent en France qu'avec 159 entreprises de plus de vingt salariés, la France se positionnant au dixième rang mondial et au quatrième européen (derrière l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni) avec 3 % de la production mondiale. Les entreprises nationales ont déserté le marché de la machine-outil standard au profit des entreprises japonaises et allemandes notamment, et se sont repositionnées sur le marché des machines spécifiques. Ce positionnement de niche leur permet de rester compétitives face à des pays à faible coût de main-d'œuvre en développant des produits à forte valeur ajoutée. Néanmoins, la taille relativement réduite des entreprises concernées ne les autorise pas à engager des sommes importantes en R&D.

Les principaux clients des entreprises européennes sont les États-Unis et la Chine, avec respectivement 10 % et 8 % des exportations.

Le rang des entreprises européennes est le même sur l'ensemble du secteur des équipements industriels (équipements électriques et de process), la

France étant en quatrième position pour la valeur ajoutée créée, derrière l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni. Le principal acteur français du secteur est Alstom.

Dans le secteur des machines agricoles, la France est au troisième rang européen derrière l'Allemagne et l'Italie. Les entreprises nationales exportent 50 % de leur production, principalement vers les pays de l'Union européenne (30 % de la production) - notamment l'Allemagne et l'Amérique du Nord (8 %). Ces marchés sont proches de la saturation. Les marchés en progression se situent en Europe de l'Est et en Russie principalement. La Chine est par ailleurs un importateur de machines agricoles, avec des importations évaluées à 4,2 Md\$ en 2004, contre 1,9 Md\$ en 2003. Les besoins de ce pays concernent essentiellement des machines de faible puissance en raison de la surface moyenne réduite des exploitations.

Équipements et machines électriques

Le secteur des équipements et machines électriques regroupe les générateurs, transformateurs, câbles électriques, fibres optiques, batteries, éclairage... Il représente une valeur ajoutée en Europe de 72 Md€ en 2001 (chiffres UE 25) et emploie environ 1,7 million de personnes. Dans ce secteur, l'Allemagne domine le marché avec 39 % de la valeur ajoutée. La France, l'Italie et le Royaume-Uni suivent avec environ 11 % de la valeur ajoutée créée chacun.

Les acteurs français, dont les représentants les plus importants sont des grands groupes internationaux tels Legrand ou Schneider Electric, positionnent la France au deuxième rang européen (un quart de la valeur ajoutée du secteur). Au total, le secteur français

des équipements et machines électriques génère un chiffre d'affaires global de l'ordre de 25,7 Md€ en 2004, pour 726 entreprises moyennes et grandes, représentant 138 000 salariés. Les trois quarts de la production sont destinés à l'exportation, essentiellement vers l'Union européenne, mais de plus en plus vers l'Asie.

La production d'équipements électriques en Europe a tendance à diminuer face à la concurrence des pays à faible coût de main-d'œuvre. Elle est fortement tributaire des capacités de production et des investissements industriels d'une part, du marché du bâtiment et des travaux publics d'autre part.

Instruments de mesure et optique de précision, instruments médicaux

Ce segment de l'analyse regroupe les instruments de mesure, qu'ils soient utilisés en contrôle de process industriel, en métrologie courante ou en environnement de recherche, les instruments d'optique de précision et l'instrumentation médicale. Dans les données statistiques, l'horlogerie est classiquement associée à cette catégorie. Il s'agit d'un secteur d'activité faible en France.

Dans son ensemble, ce segment représente une valeur ajoutée de 48 Md€ en 2001 dans l'UE 25 pour un effectif de 995 000 personnes. Le trio de tête des acteurs européens du domaine est composé de l'Allemagne avec un tiers de la valeur ajoutée, du Royaume-Uni (17,8 %) et de la France (16,1 %). Il s'agit d'un secteur relativement dynamique, tiré par l'innovation.

En 2004, les acteurs français génèrent un chiffre d'affaires estimé à 15,8 Md€, avec 81 000 salariés dans 708 moyennes ou grandes entreprises.

Dans le domaine spécifique de l'instrumentation médicale et des sciences du

vivant, les entreprises à capitaux français sont pour la plupart des PME de moins de 100 personnes. Les plus grandes entreprises installées sur le sol français sont des filiales de groupes étrangers, essentiellement américains, qui se partagent l'essentiel du marché mondial et les deux tiers du marché français.

La maîtrise des coûts de santé s'inscrit dans les politiques publiques françaises et européennes. Cette tendance va à l'encontre du développement de l'industrie de l'imagerie médicale et de l'instrumentation chirurgicale ; mais elle est contrebalancée par plusieurs phénomènes durables :

- le vieillissement de la population entraîne des besoins forts en moyens de diagnostic et de traitement. Ce fait de société offre à l'industrie pharmaceutique et aux acteurs de l'équipement médical un potentiel de développement important ;
- dans la même direction, la société occidentale considère de plus en plus la maladie comme un aléa inacceptable. La demande est donc forte en moyens de diagnostic comme de traitement ;
- selon la Commission européenne, la part des appareils médicaux dans les budgets de santé a dépassé, dans certains pays, celle des produits pharmaceutiques ;
- enfin, la demande des pays émergents en équipement médico-chirurgical est en forte croissance, offrant aux entreprises européennes de nouveaux débouchés commerciaux.

Dans le domaine des sciences du vivant, la France jouit d'un haut niveau de compétence académique à travers ses centres de recherche (Inserm, Inra, CNRS...) et les laboratoires universitaires liés aux hôpitaux. Par ailleurs, l'excellence est également reconnue dans les domaines des technologies nécessaires à l'observation du vivant et au

développement de l'instrumentation médico-chirurgicale (analyse d'images, laser, automatique, informatique).

Les enjeux du secteur

Les défis qui dictent les évolutions du secteur industriel, aussi bien en termes d'équipement que de méthodes de gestion et de production, découlent de l'évolution globale de la société. On peut dégager les grands enjeux suivants :

- sur le plan économique, le principal enjeu de l'industrie française et européenne est de faire face à la montée en puissance de la concurrence des pays à faible coût de main-d'œuvre pour la production de masse des biens de consommation. Des domaines tels que l'industrie textile, après avoir subi la concurrence des pays du Maghreb, affrontent la croissance de la puissance industrielle de la Chine. Des réorientations de l'activité vers des créneaux à plus forte valeur ajoutée s'avèrent nécessaires. Créneaux sur lesquels les capacités d'innovation de l'industrie et du monde académique français et européens constituent des atouts primordiaux. Faute d'adaptation de l'industrie aux mutations du marché, l'impact sur l'emploi salarié en France peut être fortement négatif. Notamment, l'industrie française doit tirer parti du caractère transversal de certaines technologies de production pour réaliser des économies d'échelle dans leur mise au point et leur mise en œuvre ;
- un des corollaires d'une croissance mondiale forte est l'augmentation de la demande en matières premières (dont le pétrole), induisant un accroissement des prix d'achat et donc un renchérissement des coûts de production. Les fluctuations monétaires, avec notamment un taux de change euro-dollar encore défavorable mi-2005, peuvent amplifier

ce phénomène et perturber la concurrence avec des pays producteurs dont la monnaie est alignée sur le dollar américain ;

- les préoccupations de la société pour la protection de l'environnement poussent à l'amélioration de la qualité des produits et à la diminution des externalités négatives de la production (déchets, consommation d'énergie, pollution). L'exigence de plus en plus importante du consommateur de disposer de produits « zéro défaut » et la réduction des temps de développement des produits imposent aux industriels de réviser leurs procédés de conception, de fabrication et de contrôle. Notamment, la traçabilité des produits et composants apparaît comme un enjeu majeur des systèmes de production modernes ;
- la société actuelle impose un rythme soutenu d'innovation. Le délai de mise sur le marché d'un produit à partir du début de sa conception est de plus en plus court ;
- la généralisation de l'utilisation de « systèmes complexes » rend nécessaire la mise au point de méthodes permettant de garantir la fiabilité et la sûreté de fonctionnement de ces systèmes. Cette évolution est d'autant plus forte que les pays européens, à la suite des États-Unis, se judiciarisent, faisant courir des risques financiers et pénaux aux industriels en cas de défaillance grave de ces systèmes ;
- le développement de la sous-traitance, de la cotraitance ou encore du concept « d'entreprise étendue » recèle des enjeux forts en termes d'organisation du travail. Cette évolution des relations client-fournisseur dans l'industrie impose des changements de méthodes de travail, de moyens et protocoles d'échanges d'informations, de critères de performance, de validation des travaux, etc. ;

• la sécurité au travail et la sûreté à long terme des conditions de travail font maintenant partie intégrante de la mise au point d'un procédé de production. Cet impératif est évidemment imposé par la réglementation. Améliorer l'ergonomie des équipements apparaît alors comme un enjeu en matière de santé : les chercheurs (INRS) mettent régulièrement en évidence des maladies professionnelles liées aux nouveaux types d'interfaces.

Dans les secteurs des sciences du vivant et du médical, l'enjeu est double :

- le premier est la réduction des dépenses de santé. Pour répondre à cet enjeu, les technologies qui permettent de diminuer la durée et le coût des hospitalisations sont de toute évidence des axes de développement durables dans le domaine des équipements médico-chirurgicaux ;
- le second est une qualité accrue du diagnostic, induisant un développement de nouvelles techniques d'analyse et de diagnostic. Les techniques d'imagerie et de diagnostic amènent également une connaissance approfondie du fonctionnement du vivant, avec des répercussions dans le domaine médical et les biotechnologies.

Les tendances d'évolution du secteur

En matière d'usages

Pour répondre aux grands enjeux décrits ci-dessus, l'industrie fait évoluer ses méthodes, ses pratiques et sa façon de concevoir ses produits et ses équipements.

De plus en plus, la production industrielle d'un objet ne repose plus sur une seule entreprise, mais sur un groupement plus ou moins lié d'entreprises de toutes tailles. Il existe une tendance lourde à l'externalisation des compéten-

ces qui ne font pas partie du cœur de métier de l'entreprise. La conception de certaines parties d'un objet industriel se trouve de fait confiée au fournisseur de rang 1 ou 2, selon des spécifications fonctionnelles précises émises par le donneur d'ordre. Ce changement de fonctionnement a pour conséquence d'imposer à « l'entreprise étendue », constituée par le donneur d'ordre et ses sous-traitants, certains principes de fonctionnement s'articulant autour de quatre types de communautés :

- une communauté de méthode : la conception et la planification des travaux de conception ou de production doivent s'appuyer sur un référentiel commun de méthodes pour l'analyse du besoin, la définition des actions ;
- une communauté de calendrier : les différents partenaires doivent s'entendre sur un plan de travail commun dans lequel ils peuvent tour à tour se trouver à un nœud du chemin critique de conception ou de fabrication du produit, toute défaillance entraînant alors des retards et des pertes financières ;
- une communauté d'outils : les partenaires doivent garantir le partage et l'échange de l'information technique ou liée à l'organisation du travail, la traçabilité des composants et produits à échanger (logistique) ;
- une communauté de jugement : des critères communs d'appréciation de l'avancement et de la qualité du travail doivent être mis en place pour permettre ou faciliter la prise de décision dans un ensemble comportant des circuits variés. Un corollaire de ce changement est le report d'une partie du risque industriel du groupe donneur d'ordre vers les sous-traitants. Par ailleurs, ces changements ont des répercussions importantes en termes d'organisation du travail et des échanges.

La compétitivité des entreprises françai-

ses et d'Europe de l'Ouest passe par une maîtrise complète des coûts de production (productivité) et de conception. De nouvelles pratiques sont donc en train de s'imposer dans le processus de création des nouveaux produits :

- l'outil de production doit être le plus flexible possible. Dans la pratique, cela revient à disposer d'un outil permettant de faire varier rapidement, en générant un minimum de pertes, les caractéristiques du produit fabriqué : changer la couleur d'un composant plastique extrudé en cours de fabrication en est un exemple ;
- un autre aspect de cette flexibilité est la possibilité pour un équipement de laboratoire de fabriquer en petites séries, ou pour un équipement de production de permettre les paramétrages nécessaires à la R&D. On trouve des exemples de ce type d'équipements dans les laboratoires de microélectronique : pour rentabiliser l'usage des équipements, le temps-machine qui n'est pas dédié à la R&D peut être utilisé à fabriquer des tranches de composants ;
- la mutualisation de moyens est une tendance lourde de l'industrie française. Avec l'appui des pouvoirs publics (État, collectivités territoriales, agences de moyens, etc.), les industriels se groupent de manière plus ou moins formelle pour exploiter en commun un outil de R&D, d'analyse, de production, ou directement des travaux de recherche d'intérêt général ;
- enfin, il devient impératif de savoir produire très rapidement et avec une qualité immédiate des petites séries de composants ou systèmes.

Les tendances technologiques

Les méthodes industrielles et les outils de conception

Des efforts marqués sont fournis par les industriels pour utiliser de nouvelles

méthodologies de conception. La gestion de la complexité des systèmes conçus en commun par des acteurs multiples au sein de l'entreprise ou d'entreprises différentes impose, outre des étapes communes de conception, des critères communs de validation des différentes étapes. Dans cette optique, des outils organisationnels, exploitant de manière intensive l'outil informatique, se diffusent dans l'industrie, en partant des grandes entreprises pour gagner peu à peu les petites entreprises industrielles, fournisseurs de rang 2 des grands groupes.

Par exemple, les outils de travail collaboratif au sens large, et de coconception, en particulier, sont un des axes de développement des outils logiciels de conception et de gestion de la production.

Afin de garantir la rapidité de conception des produits et des procédés, il est de plus en plus fait usage de la simulation, qui s'appuie sur des modélisations poussées des systèmes concernés. Ainsi, si la simulation permet de tester un objet avant sa fabrication (prototypage virtuel), elle permet également de « construire » entièrement et de simuler le fonctionnement d'une chaîne de production ou d'une chaîne logistique, par exemple.

En conception, les outils de simulation devront de plus en plus prendre en

charge les aspects suivants :

- le caractère multidisciplinaire de la conception : la simulation doit permettre l'échange des données entre les différents champs de la simulation, c'est-à-dire entre des disciplines différentes ;
- le caractère multiéchelle : la tendance à la diminution de la taille, caractéristique des composants, notamment dans le domaine des nanotechnologies ou des matériaux (matériaux nanostructurés), rend nécessaire la prise en compte de phénomènes physiques micro et macroscopiques lors de la conception d'un produit. L'articulation entre ces deux échelles de phénomènes devient un axe de développement des outils de simulation dédiés à la conception.

Les machines et équipements industriels

On peut mettre en évidence plusieurs tendances technologiques fortes dans le domaine des équipements industriels :

- de plus en plus, il est tenu compte de l'opérateur lors de la conception des interfaces homme-machine. L'ergonomie bénéficie des travaux fondamentaux menés dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de l'informatique ou encore des interfaces industrielles ;
- dans un parc hétérogène d'équipements industriels, la transmission de données reste encore difficile à l'heure

actuelle. Cependant, des efforts doivent être faits pour établir des normes sur les protocoles de communication, qui seront reprises par les fabricants d'équipements de production et de contrôle pour assurer une compatibilité minimale des équipements entre eux ;

- dans de nombreux domaines, la propreté de l'environnement de production est un enjeu important pour garantir la qualité des produits fabriqués. Ce facteur doit être pris en compte dans la conception des équipements dédiés.

Sur un plan technique, deux tendances fortes guident les développements technologiques pour les équipements médico-chirurgicaux :

- la convergence entre biologie et médecine pour l'analyse fait que les techniques de diagnostic tirent parti des développements des méthodes d'imagerie des sciences du vivant et d'analyse biologique pour améliorer, d'une part la compréhension des phénomènes physiologiques, d'autre part l'analyse in vivo des tissus, pour un diagnostic plus sûr, plus rapide et éventuellement moins contraignant pour le patient ;
- l'amélioration des méthodes chirurgicales mini-invasives constitue, également, un objectif majeur pour limiter l'importance de l'intrusion des interventions chirurgicales, et par conséquent la durée et le coût des interventions et des hospitalisations.

Technologies et méthodes de production



74. Contrôle de procédés par analyse d'image

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

L'analyse d'image occupe une part de plus en plus importante dans le contrôle industriel. Dans la chaîne de production industrielle, elle est utilisée dans différentes applications pour :

- la vision industrielle : l'automate de production est doté de capacités de « vision » permettant d'adapter l'action au contexte ;
- le contrôle en ligne : l'analyse par différents moyens utilisant l'image des objets industriels en cours de fabrication permet un contrôle en ligne de la qualité et un tri automatique des objets ;
- la métrologie hors ligne : l'analyse d'image permet également le contrôle hors ligne d'objets industriels (métrologie 3D par exemple).

Le groupe de technologies, objet de cette fiche, comprend toutes les « briques » techniques entrant dans la composition d'une chaîne de traitement par analyse d'image pour le contrôle de procédés industriels, qu'elles soient matérielles, logicielles ou conceptuelles :

- technologies de capture d'image (caméras, cartes vidéo, etc.) ;
- traitement et analyse d'image ;
- technologies de reconnaissance de forme ;
- thermographie infrarouge ;
- imagerie spectroscopique ;
- analyse statistique.

Ces technologies sont intégrées à la chaîne de production, et possèdent, de ce fait, des liens évidents avec les outils de production, notamment avec la chaîne de communication. Ce positionnement fait apparaître un verrou transversal de l'outil industriel qui porte sur la normalisation des protocoles de communication machine-machine.

Les dispositifs de traitement et d'analyse

d'image sont en cours de diffusion. Leur développement est au stade industriel. Cependant ces technologies sont en constant progrès à travers leurs diverses composantes : matérielles (caméras, cartes vidéo, calculateurs) et logicielles (reconnaissance de forme, analyse de granularité, colorimétrie,...). Les évolutions de l'analyse automatique d'image permettent d'envisager de nouvelles applications, augmentant le périmètre des usages possibles.

Enjeux, Impact

Dans le contexte industriel français, les enjeux sont importants en termes de compétitivité industrielle pour deux types d'acteurs. Les sociétés proposant de tels dispositifs sont tenues de rester au meilleur niveau de compétences pour faire face à une concurrence étrangère prédominante. D'autre part les industriels utilisent de plus en plus ces systèmes permettant d'automatiser, d'accélérer et de fiabiliser le contrôle de production. Les industriels du domaine étant pour la plupart étrangers, l'enjeu pour la compétitivité française se situe essentiellement dans l'amélioration du contrôle pour les utilisateurs.

Cependant, on constate que la France possède un niveau relativement élevé d'expertise dans le domaine du traitement d'image à travers le tissu de la recherche académique. Quelques PME françaises se positionnent également sur ce créneau. Le potentiel existe donc pour un développement accru de l'activité dans les applications industrielles de l'analyse d'image.

Marché

Les usages de ces technologies sont nombreux. Dans le contrôle de procédé, l'analyse

Technologies et méthodes de production

d'image en ligne de production a essentiellement deux types d'applications :

- le contrôle de la qualité de la production ;
- le contrôle des équipements de production eux-mêmes.

Des exemples de caractéristiques qu'il est possible de contrôler sont indiqués ci-après :

- la couleur (production manufacturière, agroalimentaire...);
- la texture (emballage, cosmétique...);
- la forme, les dimensions (toutes industries manufacturières, décodage d'ADN...);
- la température (surveillance des points chauds sur un four...);
- le comptage d'objets ;
- la détection de défauts (déformations, teinte, corrosion...);
- la granularité (analyse de poudres, de grains, de farines...).

Le potentiel de diffusion de la technologie est important. Si ces technologies sont déjà couramment utilisées par les industriels, les PME-PMI, dans leur grande majorité, ne tirent pas encore parti de ces technologies. Le potentiel de marché se trouve donc dans une diffusion plus large de ces technologies vers de nouveaux acteurs, éventuellement à travers de nouvelles applications.

La croissance attendue du marché des systèmes compacts de vision (ne faisant pas intervenir un traitement par un PC externe) est de l'ordre de 10 % jusqu'en 2011, date à laquelle le marché des systèmes compacts atteindra 1 Md\$. Le marché global de la vision industrielle représentait en 2002 5,3 Md\$ dans le monde, dont 1,3 Md\$ pour le marché européen, le marché le plus important étant le marché japonais. Il apparaît que

les secteurs d'applications les plus porteurs du marché des systèmes compacts sont les secteurs agroalimentaire, pharmaceutique et de l'emballage.

Acteurs

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

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

■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur).

■ Liens avec (technologies) : automatisation du tri des déchets ; traçabilité ; interfaces humain-machine ; affichage nomade ; capteurs intelligents et traitement du signal ; procédés et systèmes de photonique ; nouveaux procédés de traitement de surface ; procédés de mise en forme de matériaux innovants ; gestion des flux de véhicules ; acquisition et traitement de données ; infrastructures routières intelligentes.

■ Principaux acteurs français

Industriels : BFI Optilas, Cognex France, I2S Vision, Kinoptik, Lord Ingénierie, Satimage, Tekcim, ...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Cognex Corp (États-Unis), Dalsa Coreco (Canada), Matrox Imaging (Canada), MVTec Software (Allemagne), National Instruments (États-Unis), Stemmer Imaging (Allemagne), Viscom AG (Allemagne) ...

■ Pour en savoir plus :

www.machinevisiononline.org

www.inria.fr

www.jautomatise.com

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; habillement, cuir ; édition, imprimerie, reproduction ; industrie pharmaceutique ; industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements mécaniques ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; industries extractives ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; industrie textile ; travail du bois et fabrication d'articles en bois ; industrie du papier et du carton ; chimie, caoutchouc, plastiques ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques ; production de combustibles et de carburants ; captage, traitement et distribution d'eau ; bâtiment ; travaux publics.

Technologies et méthodes de production



75. Capteurs intelligents et traitement du signal

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Dans cette fiche, un capteur intelligent est défini comme un système intégré comprenant d'une part le moyen de réaliser une mesure (capteur proprement dit), d'autre part les moyens de conversion de cette mesure en une information utilisable directement par un système de niveau supérieur ou un opérateur humain (« intelligence » ou traitement du signal et communication). Dans la plupart des cas, l'information traitée est émise sur un réseau de communication sous forme numérique. À l'heure actuelle, les capteurs intelligents se retrouvent dans un grand nombre d'applications qui ont vocation à devenir de plus en plus nombreuses au fur et à mesure que les technologies d'intégration (micro et nanosystèmes) se développent.

Les capteurs intelligents sont partie intégrante des grands systèmes complexes que sont les avions, les véhicules spatiaux mais aussi les automobiles, les bâtiments et les ouvrages d'art. Sont compris comme capteurs intelligents les capteurs « faible flux », permettant la capture de signaux faibles, et les capteurs « répartis », construisant une information unique à partir de points de capture répartis sur l'objet de la mesure.

Verrous

Différents verrous technologiques doivent être levés suivant le type de capteur. Parmi les plus importants :

- l'intégration des différents composants dans des systèmes dont les caractéristiques sont adaptées à l'application. À titre d'exemple, les contraintes sur un capteur de vibrations destiné à un appareil photo (taille, dynamique, etc.) sont très différentes de celles d'un capteur de vibration destiné à la surveil-

lance d'un ouvrage d'art. Ainsi les technologies permettant de lever ces verrous relèvent tant des nanocomposants que de l'électronique intégrée ou de l'informatique embarquée. Techniquement, l'intégration de l'électronique doit se faire au plus près du capteur pour bénéficier de l'intégralité du signal disponible en limitant les sources de bruit additionnelles ;

- la capture du signal : alors que certaines techniques de mesure sont parfaitement maîtrisées, de nouveaux capteurs doivent être mis au point dans certains domaines, pour des raisons de coût ou de performance (capteurs optiques de détection d'espèces chimiques, accéléromètre triaxe...)
- le coût des composants : suivant le domaine d'application, le coût de développement et de fabrication est l'enjeu majeur. À titre d'illustration, le secteur automobile n'intègre des technologies dans ses véhicules moyen de gamme et bas de gamme que lorsque leur prix d'achat en volume est compatible avec les contraintes propres au secteur ;
- enfin, le conditionnement des capteurs est également un enjeu technique important pour l'implantation des capteurs dans des milieux « hostiles » (humidité, température, vibrations, etc.).

Applications

Des capteurs intelligents sont d'ores et déjà intégrés dans des systèmes complexes tels que les véhicules terrestres, les aéronefs, les équipements de production. Les développements à poursuivre concernent aussi bien les technologies de capteur que l'intégration ou les protocoles de communication.

La tendance est également orientée vers le développement de capteurs intégrant la mesure de plusieurs grandeurs pour en tirer

Technologies et méthodes de production

une information à haute valeur ajoutée.

Enfin, le capteur intégrant un calculateur est potentiellement en mesure de tenir compte d'informations externes pour traiter le signal (influence de la température sur la mesure, auto-calibrage, etc.).

On peut également citer comme partie importante des capteurs intelligents les antennes adaptatives (par exemple bibandes ou tribandes), dont les évolutions permettront le développement de nouvelles applications dans le domaine des communications.

Enjeux, Impact

Le développement et l'application de normes dans ce domaine est, de l'avis général, l'enjeu principal pour la réussite commerciale des produits réalisés. Deux points sont plus particulièrement préoccupants : la connectique et les protocoles de communication (CAN ou *Controller Area Network* dans un véhicule, par exemple, norme EN 50170 sur les réseaux de terrain). La normalisation et sa mise en œuvre sont un enjeu majeur du développement des capteurs intelligents. Le consortium FlexRay s'est constitué pour promouvoir des normes de communication dans l'automobile (*x-by-wire*). La norme IEEE P1451 vise à uniformiser les interfaces *plug-and-play* pour les capteurs intelligents.

L'enjeu est crucial pour la compétitivité française, que ce soit au niveau des marchés des capteurs intelligents ou de la maîtrise des technologies entrant dans la conception des systèmes complexes.

L'objectif des investissements dans le domaine des capteurs intelligents est de renforcer la position de la France, qui est déjà dans le peloton de tête pour le développement de certains de ces capteurs intelligents, aussi bien d'un point de vue industriel qu'académique. L'impact en termes d'emplois à moyen terme est important, de manière directe pour la conception et la fabrication des composants, et indirecte pour les implications dans les systèmes complexes et les outils de conception et de production. Le potentiel en R&D dans les domaines connexes aux capteurs intelligents renforce l'attractivité du territoire français pour les industriels du secteur, et notamment des régions en pointe telles que Rhône-Alpes et Paca.

Marché

Tous les secteurs industriels, plus particulièrement l'aéronautique, l'automobile, les équipements de production, le BTP constituent des marchés pour les capteurs intelligents. Ainsi, au niveau :

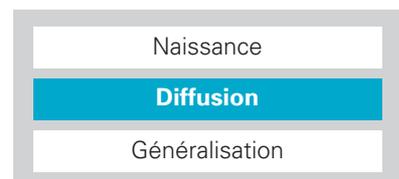
- de l'automobile : capteurs d'assiette, de freinage, de patinage. Dans ce domaine, les capteurs intelligents sont d'ores et déjà adaptés aux protocoles standardisés de communication. Le coût est un enjeu important ;
- de la télésurveillance : cette application est un secteur extrêmement porteur à moyen terme, notamment dans le domaine médical. Le capteur lié à la télésurveillance inclut soit un moyen de communication à distance (surveillance d'ouvrages d'art par exemple), soit un enregistreur de données (surveillance médicale à domicile) ; dans ce dernier cas, la transmission des données peut se faire depuis le domicile du patient vers le praticien ;
- de la domotique et des applications en électronique domestique : appareils photo, détecteurs de fumée... ;
- du contrôle industriel ;
- de la gestion du bâtiment ;
- des nouvelles applications : les capteurs sont partie prenante des nouvelles interfaces homme-machine dans le cadre notamment des systèmes de réalité virtuelle (gants tactiles, casques de réalité virtuelle, etc.) ;
- enfin, de toutes les applications ayant à prendre en compte l'environnement et qui sont susceptibles d'inclure ce type de technologie.

Le marché des capteurs est évalué à 50 Md\$ en 2008. La tendance est à une augmentation forte du marché dans les années à venir, avec une croissance annuelle moyenne envisagée de l'ordre de 7 % pour les États-Unis, cette croissance étant portée essentiellement par les capteurs à haute valeur ajoutée.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : biochimie, traitement du signal, électronique, optronique.
- Compétences technologiques : semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle.
- Pôles de compétitivité : Elopsys (Limousin et Midi-Pyrénées), System@tic (Île-de-

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies et méthodes de production

France), Minalogic (Rhône-Alpes), Micro-techniques (Franche-Comté).

■ Liens avec (technologies) : automatisation du tri des déchets ; systèmes d'enveloppe de bâtiment ; traçabilité ; infrastructures routières intelligentes ; sécurité active des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; liaisons de données véhicule-infrastructure ; RFID et cartes sans contact ; acquisition et traitement de données ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; contrôle de procédés par analyse d'image ; ingénierie des systèmes complexes.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Leti, Lime ...

Industriels : Auxitrol, ST Microelectronics, Valéo, ...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Analog Devices (États-Unis), Delphi (États-Unis), Freescale (États-Unis), Honeywell (États-Unis), Texas Instruments (États-Unis), Xerox (États-Unis), PCB Piezotronics (États-Unis), Omron (Japon), Philips (Pays-Bas), Infineon (Allemagne), Beis Sensors&Systems (Allemagne), Robert Bosch (Allemagne), ...

■ Pour en savoir plus : www.sensorsportal.com



76. Assemblage multimatériaux

Description

L'évolution des techniques d'assemblage accompagne la généralisation des systèmes multimatériaux développés pour répondre aux exigences des marchés utilisateurs : allègement, esthétique, nouvelles fonctionnalités. La réussite de la synergie des propriétés des différents matériaux composant une structure passe par la transmission optimale des contraintes entre eux. Les techniques concernées utilisent des mécanismes physiques (soudage, brasage, rivetage, vissage, boulonnage, sertissage,...) ou chimiques (collage).

Dans le domaine du soudage, les innovations concernent, notamment, le développement du soudage laser et du soudage par friction. Le soudage à l'arc connaît également de nouveaux développements (soudage bifil), ou est associé à ces nouvelles techniques (soudage hybride laser-arc). D'autres techniques physiques se développent parallèlement au soudage laser et par friction : assemblage par faisceaux d'électrons, par ultrasons, par explosion.

Le collage, utilisé seul ou en combinaison avec d'autres techniques, permet de grands nombres d'assemblages multimatériaux, ainsi qu'un allègement des structures et une amélioration de l'esthétique. Des évolutions restent nécessaires pour améliorer la durabilité (tenue en température et en environnements sévères) et la rapidité des assemblages par collage. Les conditions d'hygiène et de sécurité apparaissent également comme des verrous au développement du collage. La combinaison de différentes techniques permet de bénéficier de leurs avantages respectifs. Les technologies considérées ici sont transversales, et permettent d'élargir la gamme des matériaux à assembler : alliages

difficiles à souder, aluminium, plastiques, bois, textiles... Parallèlement, le développement des techniques d'évaluation non destructive des assemblages est également important.

La durabilité des assemblages est un point clé pour le développement de ces techniques. La présence d'interfaces à diverses échelles, qu'il s'agisse de raccordement de structures, en particulier constituées de matériaux différents, par tous procédés (rivetage, soudage, collage...) ou de réalisation de multimatériaux, voire de composites, met en jeu des phénomènes spécifiques, particulièrement sensibles à l'environnement et aux effets de couplage.

Enjeux, Impact

Les principaux enjeux socio-économiques du développement des technologies d'assemblage sont en fait associés aux enjeux des structures et composants multimatériaux : solidité, durabilité, légèreté, sécurité, esthétique. Ces enjeux correspondent aux propriétés recherchées dans les domaines d'application de la technologie. Par exemple, favoriser l'allègement des structures contribue à limiter les consommations énergétiques des moyens de transport.

Des enjeux spécifiques aux techniques d'assemblage existent également. L'amélioration de la durabilité représente un bénéfice du point de vue de la sécurité. L'évolution des techniques de collage doit se faire dans le sens d'un moindre impact environnemental des procédés (réduction des émissions et des solvants) et des produits.

Le respect des exigences réglementaires est un autre enjeu pour les techniques d'assemblage : remplacement du brasage au plomb ou capacité à être désassemblé pour permet-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

tre le recyclage des produits en fin de vie (véhicules hors d'usage, équipements électriques et électroniques,...).

Par ailleurs, les innovations dans le domaine visent, dans la plupart des cas et souvent comme premier objectif, à réaliser des gains de productivité : économie de temps, économie d'étapes (phases de préparation...). Les nouvelles techniques d'assemblage contribuent ainsi à la compétitivité des nombreux secteurs industriels utilisateurs. L'impact de ces gains de productivité est largement perçu par les entreprises. D'après une étude du ministère chargé de l'Industrie datant de 2002, de nombreuses entreprises ont connu des évolutions du mode d'assemblage au cours des dernières années : 13 % ont ainsi changé de technique d'assemblage. Dans certains secteurs industriels, ces évolutions et changements se matérialisent par des gains de productivité significatifs sur l'opération d'assemblage.

Marché

Les marchés les plus exigeants en termes de performances des matériaux et des structures, pour lesquels les environnements sont sévères, portent les évolutions technologiques dans le domaine de l'assemblage : aéronautique, aérospatiale et construction navale, notamment.

De nombreux autres marchés, pour lesquels l'allègement, l'esthétique ou la complexité des formes sont importants, sont également concernés par les évolutions des techniques d'assemblage multimatériaux : ameublement, automobile, bâtiment, emballage, ferroviaire, mécanique, nautisme, sports et loisirs...

Les entreprises réunies au sein des groupes « soudage-coupage » et « assemblage-montage » du Symap (Syndicat de la machine-outil, du soudage, de l'assemblage et de la productique associée - France) ont réalisé un chiffre d'affaires supérieur à 1,2 Md€ en 2002.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : chimie physique, matériaux, optique, physique des milieux denses, mécanique, génie des matériaux.

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

■ Pôles de compétitivité : EMC2 (Pays de la Loire), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

Le pôle EMC2, initié par Airbus, Alstom, DCN et le groupe Beneteau, est particulièrement concerné par les technologies d'assemblage ; l'un des projets du pôle est consacré spécifiquement à la conception et l'assemblage des multimatériaux.

■ Liens avec (technologies) : systèmes d'enveloppe de bâtiment ; textiles techniques et fonctionnels ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; turbomachines ; fonctionnalisation des matériaux ; nouveaux procédés de traitement de surface ; procédés de mise en forme de matériaux innovants.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cetim, CLFA, CNRT-Multimatériaux, composites et systèmes (Bordeaux), Creacol, CTBA, Institut de soudure, Lermab Nancy, Rescoll.

Industriels : Air Liquide Welding, Bostik, Symap : Syndicat de la machine-outil, du soudage, de l'assemblage et de la productique associée.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Edison Welding Institute (États-Unis), Huntsman (États-Unis), Henkel (Allemagne), TWI (Welding Institute - Royaume-Uni).

Commentaires

Les technologies d'assemblage multimatériaux bénéficient de la présence sur le territoire français de plusieurs leaders mondiaux sur les marchés qui portent l'innovation du secteur : Airbus, Alstom, DCN et le groupe Beneteau notamment. Les constructeurs automobiles sont également utilisateurs de ces technologies. L'expertise française dans les domaines du soudage et du collage est un atout.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; industries des équipements mécaniques ; bâtiment.



77. Micro et nanocomposants

Description

Les nanocomposants représentent l'évolution vers un ordre de grandeur inférieur des microcomposants et microsystèmes. Les évolutions des microcomposants et microsystèmes vers les nanocomposants et nanosystèmes recouvrent un ensemble de verrous auxquels les technologies objets de cette fiche permettent de répondre tels que :

- inventer de nouvelles applications (biopuces...);
- miniaturiser les architectures actuelles en microélectronique ;
- améliorer la durée de vie des composants ;
- fiabiliser les composants ;
- conditionner-encapsuler les composants pour des utilisations dans des conditions données (température, vibrations, rayonnement...);
- créer de nouvelles fonctions (microfluidique, électronique de spin...);
- intégrer des fonctions hétérogènes : électriques, optiques, électroniques, mécaniques, logiques, magnétiques.

Les objets porteurs de ces technologies se trouvent alors dans des circuits électroniques, des capteurs, des filtres optiques, des actionneurs (MEMS ou *Micro Electro Mechanical Components*, MOEMS ou *Micro Opto-Electro Mechanical Components*), etc. Les technologies clés pour la réalisation de ces composants ou systèmes comprennent de manière non exhaustive :

- les procédés de lithographie : photolithographie, moulage, gravure ionique, etc. On note que les procédés de photolithographie sont à un tournant de leur évolution. Les prochaines technologies de gravure à une longueur d'onde de 157 nm sont en passe d'être évincées au profit des technologies en extrême UV, pour lesquelles les outils en

développement sont en rupture par rapport aux outils actuels ;

- les procédés d'assemblage moléculaire : l'hybridation de certaines espèces sur des espèces différentes permettent la création de milieux auto-organisés à l'échelle moléculaire, pour optimiser les performances des matériaux ou faciliter leur mise en forme ;
- la simulation des procédés de fabrication ;
- les outils d'aide à la conception des systèmes : outils de design, de simulation du composant et de son conditionnement. Dans cette catégorie entrent des logiciels de calcul multiéchelle qui permettent de passer des propriétés microscopiques des matériaux et interfaces aux propriétés macroscopiques du composant ;
- les outils de contrôle et de caractérisation des composants, aussi bien pour une phase amont que lors de l'industrialisation : propriétés électroniques, mécaniques, vibratoires, optiques, contrôle de la forme et des dimensions ;
- les méthodes de conception assurant un fonctionnement fiable et durable. Dans certains cas, les composants et systèmes réalisés doivent garantir un niveau de performances dans un environnement sévère (par exemple, accéléromètres pour déclenchement d'airbags) ;
- les matériaux, essentiellement à base de semi-conducteurs, incluent de plus des diélectriques, des céramiques, etc. pour leurs propriétés optiques, électriques, thermiques, mécaniques ;
- les outils de fabrication : la miniaturisation des composants existants et les nouvelles fonctions rendues possibles par cette miniaturisation demandent des outils de production différents des outils actuels, au-delà de la lithographie elle-même : conditionnement,

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

manipulation, croissance de couches, usinage (dont *Focus Ion Beam*) ;

- les architectures d'intégration : traditionnellement planaires, elles exploitent de plus en plus la troisième dimension pour améliorer la compacité des systèmes et leurs performances. Notamment, la nanoconnectique est un concept en cours de développement chez les grands fondeurs.

Ces technologies sont en phase de croissance. Les grands acteurs du domaine ont déjà établi leur expertise sur le sujet, mais cette famille de technologies recèle encore un potentiel de développement technique important. Notamment, de nouveaux objets inexistant à l'échelle micrométrique sont développés : nanofils, nanotubes... La compréhension des phénomènes inhérents à ces structures se fait au niveau quantique.

Enjeux, Impact

Pour ces technologies, les enjeux normatifs sont importants, tout comme pour les capteurs intelligents et le traitement du signal. Au niveau socio-économique, l'enjeu majeur pour la France est le développement de l'emploi dans ce secteur, via la conception et la fabrication de produits à forte valeur ajoutée. Par ailleurs, des enjeux en termes de standardisation des méthodes de fabrication existent. Cette standardisation permettra aux leaders du marché, lorsque celui-ci sera plus mûr, de sous-traiter une partie de la production, de la même manière qu'en microélectronique, à l'heure actuelle.

La France est un territoire d'ores et déjà hautement attractif pour les industriels des nanocomposants en raison de la forte concentration et du haut niveau d'expertise des acteurs académiques et industriels autour des centres de Grenoble, Rousset, Sophia-Antipolis et Paris Sud. L'impact en termes d'image est donc primordial.

Économiquement, les systèmes intégrés décrits ci-dessus sont considérés comme un des moteurs de la croissance des années à venir. Les emplois créés sont des emplois à haute valeur ajoutée, et contribuent à renforcer l'expertise française dans le domaine.

Marché

Les nanocomposants trouvent leur usage dans un grand nombre de domaines, parmi

lesquels, sans les citer tous :

- les circuits électroniques et optoélectroniques : la réduction de la largeur de trait, caractéristique de la densité surfacique de composants, améliore les fréquences de fonctionnement. Cette réduction de la résolution des motifs induit, à terme, des changements dans les phénomènes physiques mis en jeu dans le fonctionnement des systèmes. Le marché global des semi-conducteurs devrait représenter en 2005 un marché mondial de 226 Md\$, dont 41 Md\$ en Europe. La croissance annuelle attendue du marché européen et mondial est comprise entre 5 % et 10 % dans les années à venir ;
- les capteurs de mouvement (accélération, vibrations, rotation) : les technologies de gravure actuelles permettent d'ores et déjà de fabriquer des capteurs utilisant des pièces en mouvement à l'échelle du micromètre (MEMS). L'enjeu, pour ces applications, réside en grande partie dans les techniques de fabrication (fiabilisation) et le conditionnement. Un autre enjeu technique pour les microcapteurs est le niveau de bruit électrique comparé à la faiblesse du signal utile qui impose une intégration à proximité de l'élément de conversion du circuit d'amplification ;
- les microactionneurs (MEMS, MOEMS) : les actionneurs à l'échelle micro ou nanométrique sont des composants clés des microsystèmes. Leur fonction peut être une interruption électrique, un routage optique ou une déflexion de lumière (vidéoprojecteurs), ou toute autre action à base mécanique. Le premier usage des MEMS en volume dans le monde est actuellement dans le domaine automobile (accéléromètres pour airbags, capteurs de pression pour pneus) ;
- les micromoteurs électrostatiques.

Le seul marché des MEMS a doublé en trois ans pour atteindre 5 Md\$ dans le monde en 2005. Cette dynamique se poursuivra dans les années à venir, portée par le développement de nouvelles fonctions, rendues elles-mêmes possibles par l'évolution des technologies clés précitées.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, physique théorique, optique, informatique, traitement du signal, électronique, photonique, optronique.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction aéronautique et spatiale ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de composants électroniques ; postes et télécommunications.
--

Technologies et méthodes de production

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

■ Pôles de compétitivité : System@tic (Île-de-France), Minalogic (Rhône-Alpes), Solutions communicantes sécurisées (PACA), Microtechniques (Franche-Comté).

■ Liens avec (technologies) : traçabilité ; gestion de la microénergie ; stockage de l'information numérique ; processeurs et systèmes ; RFID et cartes sans contact ; matériaux pour l'électronique et la mesure ; capteurs intelligents et traitement du signal ; procédés et systèmes de photonique ; composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; vectorisation ; imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant ; techniques de criblage et de synthèse à haut débit.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA Leti, Minatec, Réseau national en nanosciences et nanotechnologies (R3N).

Industriels : ST Microelectronics, Philips Semiconducteur, Freescale Semiconductor, (regroupés dans l'alliance Crolles2) ; Memscap, Sofradir, Teem Photonics, Soitec.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Forschungszentrum Rossendorf (FZR, Allemagne), Massachusetts Institute of Technology (MIT, États-Unis), Bell laboratories (États-Unis), Kavli Nanosciences Institute (Caltech, États-Unis) ; Intel (États-Unis), Texas Instruments (États-Unis), Analog Devices (États-Unis), Canon (Japon), Hitachi (Japon), Samsung (Corée du Sud), Infineon (Allemagne), Robert Bosch (Allemagne).

■ Pour en savoir plus :

Plate-forme technologique européenne pour la nanoélectronique (www.cordis.lu/ist/eniac).

Rapport parlementaire Microélectronique et nanotechnologies : une chance à saisir (www.senat.fr/rap/r02-244/r02-244.htm).

Réseau de recherche en micro et nanotechnologies - réseau nanosciences et nanotechnologies (www.rmnt.org).

À la découverte du nanomonde (www.recherche.gouv.fr/brochure/nanomonde.pdf).

Commentaires

L'observatoire des micro et nanotechnologies, unité mixte de service CEA-CNRS, créée en 2005, maintient une veille stratégique sur les sujets liés aux micro et nano-objets, au niveau de la science et des procédés de fabrication.

Technologies et méthodes de production



78. Procédés et systèmes de photonique

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La photonique est une science dont les applications sont par essence diffusantes dans un grand nombre de domaines d'application, au même titre que l'électronique. La photonique est la science qui traite des photons, particules élémentaires composant la lumière. Ainsi, les systèmes photoniques sont des dispositifs qui permettent de générer, conduire, traiter et détecter la lumière. La nature, l'échelle et les longueurs d'ondes des systèmes considérés sont très variées. On peut citer les exemples suivants :

- sources de photons :
 - lasers et diodes laser pour applications industrielles, grand public, de recherche, etc. ;
 - diodes électroluminescentes (DEL) pour la signalisation, l'éclairage, la transmission de données ;
- matériaux :
 - méthodes sol-gel pour la réalisation de nouveaux matériaux ;
 - cristaux photoniques ;
 - boîtes quantiques, puits quantiques ;
 - couches minces ;
- transmission et mise en forme :
 - guides d'ondes (fibres, guides planaires) pour conduire la lumière ;
 - les filtres, modulateurs et tous éléments actifs permettant de mettre en forme un signal optique ;
 - les composants optoélectroniques ;
- détection, mesure : les instruments de mesure, de détection, de diagnostic à base d'optique ou de photonique (microscopes confocaux, à sonde, capteurs à fibre optique, endoscopes...) ;
- conception : les logiciels de conception et de simulation des systèmes photoniques, comme dans les autres domaines, sont dés-

ormais un élément clé du développement du secteur ;

- procédés de fabrication : technologies du semi-conducteur et des MEMS (*Micro Electro Mechanical Components*).

Tendances technologiques

Les évolutions des dispositifs photoniques suivent deux tendances fortes : l'une vers des dispositifs de dimensions de plus en plus petites et avec des constantes de temps de plus en plus faibles (lasers femtoseconde, par exemple), l'autre vers des dispositifs à forte puissance, dont un cas extrême est le laser Megajoule.

Par ailleurs, la conception de ces dispositifs est de plus en plus multidisciplinaire, couplant optique, mécanique, électronique, biologie, chimie, sciences des matériaux, etc. Les procédés de conception des systèmes photoniques tirent parti de ces différentes disciplines. Ainsi, les MOEMS (*Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*) sont directement liés aux technologies des micro et nanocomposants, et tirent parti des technologies du semi-conducteur pour leur fabrication. Les capteurs opto-chimiques et les procédés sol-gel nécessitent des compétences en chimie. Les outils de diagnostics en sciences du vivant font intervenir la biologie.

Enjeux, Impact

Le développement de l'industrie française et européenne dans le secteur de la photonique est faible en comparaison du niveau élevé de la recherche dans ce domaine. Si le marché très porteur des écrans plats de grande dimension est inaccessible à l'industrie française en raison d'un retard d'investissements difficile à rattraper et de coûts de main-d'œuvre élevés, la photonique reste un

Technologies et méthodes de production

secteur de production à haute valeur ajoutée. Il devra répondre aux besoins de la société de l'information en matière de transport, traitement et stockage de l'information.

La filière française, organisée en pôles régionaux regroupés au sein du Comité national d'optique et photonique (Cnop), met l'accent sur les systèmes à forte valeur ajoutée. L'enjeu pour l'industrie française est de maintenir et d'améliorer sa position sur le marché des composants et systèmes photoniques. La maîtrise de ces technologies est particulièrement stratégique compte tenu de la place qu'elles occupent dans l'économie mondiale.

L'industrie française de la photonique représente quelque 20 000 emplois. Son développement est susceptible de permettre la création de nombreux emplois à forte qualification.

Marché

Le marché mondial de l'industrie photonique était estimé en 2004 à 203 Md\$, soit le même ordre de grandeur que l'industrie des semi-conducteurs. La croissance annuelle du marché de la photonique atteint 15 % en moyenne, contre 10 % jusqu'en 2003, faisant de ce secteur l'un des plus dynamiques. La part de l'Europe est estimée à environ 60 Md\$.

La plus forte croissance du marché est constatée dans le domaine des écrans plats, toutes technologies et tailles confondues, avec une croissance annuelle de 41 %. Le deuxième segment le plus dynamique est le segment des composants optoélectroniques, avec une croissance annuelle de 26 % (le seul marché des diodes électroluminescentes était évalué à 2 Md\$, en 2002). Le marché des instruments de lithographie pour les semi-conducteurs est, lui, estimé à 1 Md\$.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : matériaux, physique théorique, optique, électronique, photonique, optronique.

■ Compétences technologiques : semi-conducteurs, optique, analyse, mesure et contrôle, traitements de surface, procédés techniques.

■ Pôles de compétitivité : Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur), Elopsys (Limousin et Midi-Pyrénées), Route des lasers (Aquitaine), Minalogic (Rhône-Alpes).

■ Liens avec (technologies) : automatisation du tri des déchets ; sécurité active des véhicules ; affichage nomade ; contrôle de procédés par analyse d'image ; imagerie et instrumentation associées aux sciences du vivant ; capteurs intelligents et traitement du signal ; micro et nanocomposants ; composants et systèmes d'éclairage à rendement amélioré ; stockage de l'information numérique.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : CEA, Leti, Institut d'optique, Onera, Sup'Optique, Cnop, Optics Valley, PopSud.

Industriels : Alcatel, Thales, Cilas, Teem Photonics, ST Microelectronics, Optis, Jobin-Yvon horiba, Sagem, Corning, Essilor.

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Lucent Technologies (États-Unis), Philips Semiconductor (Pays-Bas), Lumileds (États-Unis), Agilent Technologies (États-Unis), Nikon Instruments (Japon), MIT (États-Unis), Coherent (États-Unis), Schott (Allemagne).

■ Pour en savoir plus :

Société européenne d'optique (www.europticalociety.org).

Commentaires

Dans le domaine de la photonique, quelques grands projets jouent (ou joueront) un rôle moteur pour l'environnement académique et industriel : synchrotron Soleil, ITER, laser Mégajoule.

Il apparaît particulièrement stratégique, compte tenu des atouts de la France en matière de compétences dans ce domaine, de maintenir une activité industrielle forte dans les activités liées à la photonique.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

Domaines d'application

Les domaines d'application de la photonique sont multiples dans la mesure où il s'agit d'une technologie essentiellement transversale, au même titre que l'électronique ou l'informatique.

On peut citer : industrie automobile ; construction navale ; construction aéronautique et spatiale ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de composants électroniques ; postes et télécommunications ; assainissement, voirie et gestion des déchets.

Technologies et méthodes de production



79. Nouveaux procédés de traitement de surface

Degré de développement

Émergence

Croissance

Maturité

Description

La fonctionnalisation des surfaces a toujours fait partie des procédés industriels de fabrication d'objets divers, que ce soit pour des raisons cosmétiques ou pour lutter contre la corrosion des métaux. De plus en plus, de nouvelles fonctions sont ajoutées aux surfaces des objets, et de nouveaux procédés sont mis au point pour assurer des fonctions déjà existantes, en réponse à des enjeux économiques ou environnementaux.

Les nouveaux procédés de traitement concernent aussi bien de nouvelles fonctions de surface que l'évolution des procédés de traitement inadaptés au contexte de la société actuelle (onéreux, polluants, nocifs, etc.). Les procédés de traitement ou de « fonctionnalisation » des surfaces sont extrêmement variés, faisant intervenir des briques technologiques telles que :

- la pulvérisation par plasma (éventuellement assistée par laser) ;
- le traitement chimique de la surface ou du matériau de base de l'objet induisant une modification physico-chimique des surfaces ;
- le greffage de fonctions moléculaires ;
- la nanostructuration des surfaces, texturation ;
- les procédés sol-gel ;
- la mise en forme par attaque chimique sèche (plasma) ou humide ;
- les dépôts de poudre (grandes surfaces) par voie électrostatique ;
- le traitement par laser des surfaces métalliques (décapage, formation d'alliages, dopage) ;
- le polissage, nanopolissage.

Les fonctions recherchées ont, par exemple, des propriétés données de réflectivité optique, d'anticorrosion, bactéricides, d'auto-nettoyage, d'adhésion, de mouillage, de frot-

tement, de sensibilité à des espèces chimiques données, etc.

La compréhension fine des mécanismes physico-chimiques en jeu aux surfaces et interfaces est un préliminaire nécessaire à la mise au point de nouveaux traitements et fonctions de surface. Elle fait intervenir les sciences des surfaces et interfaces, qui nécessitent des compétences multidisciplinaires : physique des matériaux, chimie, physico-chimie, biochimie. On note que la biomimétique est un axe de développement important de la fonctionnalisation des surfaces.

Dans ce cadre, les procédés de caractérisation et d'analyse des surfaces revêtent une importance élevée : texture, propriétés électriques ou optiques, durabilité, tenue en température, frottements...

Les technologies de traitement de surface sont en développement constant depuis plusieurs décennies. Les sciences des interfaces sont maintenant reconnues comme des disciplines scientifiques à part entière, favorisant un développement rapide de nouveaux procédés et traitements, et des transferts de technologie du monde de la recherche académique vers l'industrie.

Enjeux, Impact

Les enjeux liés à la maîtrise et au développement des technologies de traitement de surface sont multiples.

D'un point de vue économique, la fonctionnalisation des surfaces est un verrou majeur dans la conception des nouveaux produits (propriétés d'autolubrification en mécanique, d'auto-nettoyage pour le verre, ou bactéricides pour les téléphones portables, dureté des surfaces, résistance à la corrosion, etc.). Dans tous les secteurs industriels, la maî-

Technologies et méthodes de production

trise de la conception et de la caractérisation de nouvelles surfaces est un enjeu majeur dans la mise au point des nouveaux produits. L'enjeu environnemental est également prépondérant pour cet ensemble de technologies. L'enjeu sociétal rejoint ici la contrainte législative et normative. Le traitement de surface est historiquement une étape polluante de la fabrication de produits, à travers l'utilisation de solvants chlorés par exemple. Par ailleurs, la composition des matériaux déposés est également une source de pollution liée à l'usure des surfaces ou à une dissémination des objets finis sous forme de déchets (par exemple, l'utilisation du chrome hexavalent est interdit dans l'industrie automobile à partir de 2007). La mise au point de procédés de traitement de surface « propres », ne faisant plus appel à des solvants (passage de procédés humides à des procédés secs), ou utilisant des solvants moins polluants répond à une demande forte de la société et à des impératifs de normes de rejets pour les industriels.

Enfin, un enjeu en terme de santé apparaît de plus en plus important. La fonctionnalisation des surfaces permet de concevoir des objets permettant de limiter les risques pour la santé (surfaces biocides, non toxiques), ou entrant dans la conception d'objets thérapeutiques (articulations artificielles, verres de lunettes, outils médicaux).

Par conséquent, il apparaît que la maîtrise des technologies de traitement de surface et la mise au point de nouvelles fonctions de surface est un atout majeur dans la conception des produits manufacturés. L'impact de ces technologies sur la compétitivité des industries et par conséquent sur l'emploi est donc immédiat.

Marché

Les traitements de surface sont des applications multiples à tous les stades du développement d'un objet matériel : de la méthode de fabrication aux fonctions de l'objet fini. Ces applications couvrent tous les secteurs d'application ; par exemple la mécanique (lubrification des pièces), l'automobile (suppression des traitements au chrome VI, démouillage des pneumatiques), cosmétique (toucher des flacons), le bâtiment (vitres autonettoyantes), l'optique (nanopolissage),

la santé (revêtements bactéricides), le vernissage (à base de poudre, sans solvants, sans pulvérisation), les procédés de nettoyage sans solvant, le textile (traitements hydrophobes).

Les traitements de surface sont des technologies largement diffusées dans l'industrie, mais les progrès industriels rendent nécessaires des évolutions de ces technologies et des procédés liés ; on peut citer comme exemple de tendance lourde la mise en place de procédés sans solvants pour certains traitements de surface. Dans un grand nombre de cas, l'évolution de la réglementation est un moteur essentiel pour les investissements dans le développement des nouveaux procédés de traitement de surface.

Le caractère très diffusant des technologies de traitement de surface rend difficile l'évaluation du marché correspondant.

Acteurs

■ Disciplines scientifiques : biochimie, chimie physique, chimie du solide, matériaux, physique théorique, génie des procédés.

■ Compétences technologiques : traitements de surface.

■ Pôles de compétitivité : Céramique (Centre, Limousin et Midi-Pyrénées), Plasturgie (Rhône-Alpes et Franche-Comté), Techtera (Rhône-Alpes), Viameca (Auvergne et Rhône-Alpes), Mipi (Lorraine), Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes), Matériaux domestiques (Nord-Pas-de-Calais).

■ Liens avec (technologies) : systèmes d'enveloppe de bâtiment ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; assemblage multimatériaux ; procédés de mise en forme de matériaux innovants ; textiles techniques et fonctionnels ; micro et nanocomposants ; fonctionnalisation des matériaux.

■ Principaux acteurs français

Centres de compétences : Cemef, Cetim, ITSFC (Institut des traitements de surface de Franche-Comté), LISS (Laboratoire d'ingénierie des surfaces de Strasbourg), LSGS (Laboratoire de science et génie des surfaces de l'INPL), Laboratoire des sciences et ingénierie des surfaces (Université Lyon I), Cirimat (Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux, Toulouse). Industriels : Groupe HEF, HIT (groupe Bodycote), environ 200 entreprises répertoriées

Degré de diffusion de la technologie

Naissance
Diffusion
Généralisation

301

Domaines d'application

Industries agricoles et alimentaires ; industrie pharmaceutique ; industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; industries des équipements mécaniques ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; chimie, caoutchouc, plastiques ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques.

Technologies et méthodes de production

sur (www.tris-online.com), Saint-Gobain...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Bodycote (Royaume-Uni), Pilkington (Royaume-Uni), Glaverbel (Belgique)...

■ Pour en savoir plus :

Association de traitement thermique et de

traitement de surface (A3TS) (www.attt.org)

Syndicat national des entreprises d'application des revêtements de surface (SATS) (www.sats-france.com).

Technologies et méthodes de production



80. Procédés de mise en forme de matériaux innovants

Description

Les matériaux innovants, qui répondent à des problématiques de fonctionnalisation des matériaux, d'amélioration des qualités des matériaux innovants, de process de production, etc. s'accompagnent d'évolutions des procédés de mise en forme.

Les procédés de mise en forme des matériaux innovants représentent une famille technologique à part entière. Si de nombreuses technologies nouvelles sont des évolutions de technologies existantes, de nouveaux procédés doivent être mis au point pour permettre le passage au stade industriel des recherches menées sur les matériaux au niveau du laboratoire.

Notamment, les matériaux multiconstituants posent des problèmes particuliers liés à des phénomènes de ségrégation en cours de process. Les composants peuvent se séparer ou s'orienter de manière préférentielle au cours du process de fabrication, conduisant à des problèmes d'uniformité de la structure. Des problèmes du même type peuvent être rencontrés avec des procédés de fabrication multiphase (solide-liquide, par exemple).

Quelques exemples de matériaux susceptibles de nécessiter des évolutions ou des ruptures dans les procédés de fabrications :

- les composites et nanocomposites ;
- les céramiques ;
- les poudres ;
- les polymères ;
- les nanotubes de carbone.

Les technologies de mise en forme des matériaux sont aussi variées que les matériaux concernés. On peut citer, par exemple, la compression de feuilles de fibres de verre, l'extrusion de polymères, le thixoformage d'alliages métalliques, le forgeage, l'injec-

tion, l'extrusion, la compression de poudres, le frittage, etc.

Il apparaît également que l'un des verrous de cette famille de technologies réside dans la compréhension des phénomènes qui régissent ces procédés de fabrication, et dans la capacité des industriels à modéliser et simuler ces procédés pour anticiper une partie des problèmes qui peuvent survenir sur la ligne de production. Notamment, la capacité à simuler de manière simultanée les phénomènes micro et macroscopiques est un atout certain dans la mise au point des procédés de mise en forme.

Enjeux, Impact

Le développement et la maîtrise des procédés de mise en forme des matériaux innovants sont essentiels au maintien des industries manufacturières françaises et européennes dans la compétition internationale. L'enjeu est le taux d'activité et d'emploi d'une partie de l'industrie manufacturière, tirée par les activités et produits innovants et à haute valeur ajoutée.

Un second enjeu auquel les nouveaux procédés de mise en forme sont amenés à répondre concerne l'environnement. Il devient de plus en plus important de mettre au point des procédés qui consomment moins d'énergie, d'eau, ou qui génèrent moins de déchets.

Marché

Les marchés servis par ces procédés sont l'ensemble des marchés de l'industrie manufacturière. Les matériaux innovants et procédés nouveaux se retrouvent dans toutes les gammes de biens d'équipement et de consommation, de la fabrication du papier aux boîtiers de téléphones mobiles.

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

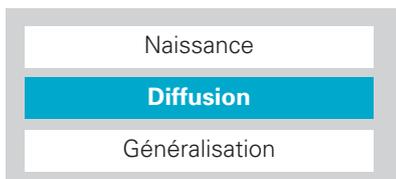
Acteurs

- Disciplines scientifiques : matériaux, mécanique des fluides, génie des procédés, mécanique, génie des matériaux.
- Compétences technologiques : analyse, mesure et contrôle, traitements de surface, matériaux - métallurgie, procédés techniques, travail des matériaux, environnement-pollution, machines-outils, procédés thermiques.
- Pôles de compétitivité : Céramique (Centre, Limousin et Midi-Pyrénées), Plasturgie (Rhône-Alpes et Franche-Comté), Techtera (Rhône-Alpes), Industries du commerce (Nord-Pas-de-Calais), Viameca (Auvergne et Rhône-Alpes), Up-TEX (Nord-Pas-de-Calais), Vallée de L'Arve (Rhône-Alpes), Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées), Microtechniques (Franche-Comté).

■ Liens avec (technologies) : systèmes d'enveloppe de bâtiment ; matériaux composites pour la construction, à base de matériaux recyclés ou de biomasse ; textiles techniques et fonctionnels ; architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre ; architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules ; matériaux nanostructurés et nanocomposites ; matériaux pour l'électronique et la mesure ; recyclage des matériaux spécifiques ; fonctionnalisation des matériaux ; assemblage multimatériaux ; nouveaux procédés de traitement de surface.

■ Principaux acteurs français
Cemef (ENSMP), Transvalor (filiale d'Armines), INPG, Aubert & Duval (Eramet), Sifcor, CETIM...

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application

Industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; industries des équipements mécaniques ; industries des équipements électriques et électroniques ; fabrication de verre et d'articles en verre ; fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction ; industrie textile ; chimie, caoutchouc, plastiques ; métallurgie et transformation des métaux ; fabrication de matériel électrique ; fabrication de composants électroniques.

Technologies et méthodes de production



81. Méthodes et outils de coconception

Description

La conception de produits industriels est de plus en plus le fait d'une collaboration entre plusieurs équipes, que l'on parle d'objets physiques, de logiciels, de procédés, etc. Cette collaboration est rendue nécessaire par, d'une part, la nécessité de recourir à des compétences multiples, de plus en plus souvent externalisées, d'autre part, la nécessité pour des sous-traitants de participer à la conception de leurs produits pour apporter un surcroît de valeur ajoutée à leur activité. Dans l'ingénierie de systèmes complexes par exemple, la coconception occupe ainsi une place de plus en plus importante : les grandes entreprises font depuis longtemps appel à la sous-traitance pour la fabrication de diverses parties d'un produit donné. De plus en plus, il est demandé au sous-traitant de concevoir cette partie, en collaboration avec les équipes du donneur d'ordre. C'est maintenant chose courante dans la construction automobile, l'aéronautique, le bâtiment ou le génie civil.

Les méthodes et outils de coconception comprennent des moyens de collaboration fondés sur :

- une organisation de l'entreprise adaptée à la coconception. Le circuit humain de circulation de l'information et de prise de décision doit être adapté aux problématiques posées par les interventions d'interlocuteurs multiples sur un objet unique ;
- un cadre de collaborations entre équipes ou entreprises qui doit prévoir le partage d'horizons temporels, de critères de fiabilité et de sûreté et de critères de performance ;
- des logiciels de conception devant comprendre des modules de prise en charge du travail collaboratif. Un corollaire de cette évolution est souvent la nécessité pour le don-

neur d'ordre d'imposer au sous-traitant ses outils logiciels. Il apparaît clairement que des tâches de gestion doivent également être facilitées par les outils ad hoc ;

- l'architecture des échanges d'information doit être pensée en fonction de ces objectifs : formats d'échanges de fichiers, lignes de transmission haut débit, etc.

Par ailleurs, la compréhension des mécanismes de fonctionnement en équipe, d'établissement du dialogue, c'est-à-dire les aspects humains de la coconception, fait l'objet de travaux de recherche par des équipes de psychologie cognitive.

Des problèmes de confidentialité des données doivent également être traités dans la conception des outils et méthodes de travail.

Enjeux, Impact

Pour les entreprises industrielles de rang 1, la coconception représente un enjeu en termes de qualité des produits réalisés et d'économie sur les coûts de conception, ceux-ci étant supportés par le sous-traitant au sein de « l'entreprise étendue ».

Dans beaucoup de domaines, les sous-traitants de rang 1 se sont adaptés aux méthodes et outils de coconception. Un enjeu majeur existe sur la capacité des sous-traitant de rang 2 à entrer dans la boucle de conception au même titre que leurs donneurs d'ordres. L'impact immédiat de l'adaptation des PME-PMI à ces pratiques est la maintien de l'activité et des emplois dans les entreprises de sous-traitance françaises.

Marché

Les applications premières des méthodes de coconception se situent dans les industries complexes faisant intervenir de nombreux sous-traitants. L'automobile et l'aéronauti-

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

que sont les marchés les plus cités pour ce type d'outils. Cependant, les domaines d'application concernent tous les types de projets de conception menés par plusieurs équipes en parallèle, notamment les grands projets architecturaux.

Si certains acteurs de la CAO (par exemple Dassault Systèmes avec Catia) proposent depuis plusieurs années des modules de coconception à leurs clients, nombre de ces systèmes ne sont pas adaptés à des PME, tant en termes d'investissements financiers qu'en termes d'adéquation de l'outil au travail quotidien de la société.

Des plates-formes collaboratives sont mises en place par divers acteurs (collectivités publiques, associations professionnelles, entreprises...) pour faciliter l'appréhension par les PME sous-traitantes de rang 2 des outils de travail collaboratif et de coconception.

Acteurs

- Disciplines scientifiques : génie des procédés, informatique, psychologie, sociologie.
- Compétence technologique : informatique.
- Pôles de compétitivité : Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France), Images et réseaux (Bretagne), Solutions communi-

cantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur), System@tic (Île-de-France).

- Liens avec (technologies) : architecture électrique des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; gestion de l'énergie à bord des véhicules ; systèmes aériens automatisés ; outils et méthodes pour le développement logiciel ; ingénierie des systèmes embarqués ; modélisation, simulation, calcul ; réalité virtuelle, augmentée, 3D ; ingénierie des systèmes complexes ; technologies du web sémantique ; travaux d'infrastructures furtifs.

■ Principaux acteurs français

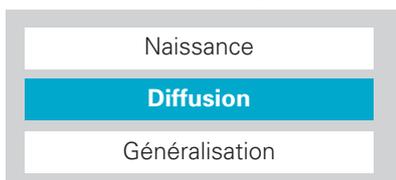
Centres de compétences : plates-formes Oree (Rhône-Alpes), PI3C (Champagne-Ardenne, Cetim), Visio-concept (Numerica, Montbéliard) ; Insa Lyon - ICTT, université Bordeaux I, Inria, Pôle productique Rhône-Alpes (www.productique.org)...

Industriels : Dassault Systèmes...

Commentaires

Des efforts doivent être poursuivis par les industriels sur la voie d'une normalisation des outils pour permettre une diffusion plus large, de manière à ce qu'ils soient économiquement viables pour les petites entreprises travaillant avec plusieurs donneurs d'ordres.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies et méthodes de production



82. Ingénierie des systèmes complexes

Description

Les systèmes complexes sont de plus en plus présents dans la vie courante, de manière plus ou moins visible. Composés de multiples briques technologiques en interaction éventuelle avec des « systèmes » humains, ils prennent en compte de nombreuses informations pour réaliser une opération complexe de façon plus ou moins automatique. La complexité du système est généralement transparente pour l'utilisateur final, mais ses défaillances peuvent avoir des conséquences lourdes en termes humains, sociaux ou économiques.

Un système complexe peut ainsi être défini comme un système, composé de sous-systèmes, dont la conception et le fonctionnement font intervenir un certain nombre de corps de métiers différents, et qu'aucun ne peut appréhender dans son ensemble. La conception d'un système complexe requiert donc des méthodes et des outils garantissant la conformité des composants, des sous-systèmes et du système fini aux spécifications tout au long de leur réalisation : qualité de services, capacité d'accueil de nouveaux sous-systèmes, etc.

Le verrou essentiel dans la conception des systèmes complexes quels qu'ils soient demeure leur fiabilité et leur sûreté de fonctionnement. Cette fiabilité doit être attestée par construction grâce aux méthodes de conception mises en place. Toutefois, la complexité du système ne permet pas de le valider intégralement ex post dans des temps satisfaisants.

Les points techniques à prendre en compte au cours de la conception des systèmes complexes sont, entre autres :

- l'architecture du système qui doit être adaptée à la fonction recherchée et au degré

de fiabilité et de sûreté nécessaires (par exemple, l'architecture du système de contrôle d'une centrale nucléaire doit prévoir les redondances nécessaires), tout en tenant compte de la durée de vie du système (par exemple, le système doit être suffisamment ouvert pour pouvoir accueillir de nouveaux composants) ;

- la diversité des technologies et des compétences liées mises en œuvre qui doit être prise en compte dès la conception, ce qui suppose des outils génériques assurant les liens entre plusieurs de ces technologies et/ou de ces compétences et des modélisations multidomaines du même système ;

• l'environnement qu'il faut bien définir. Cette étape intervient dès la mise au point des spécifications fonctionnelles du système ;

- des systèmes de validation qui doivent pouvoir certifier le bon fonctionnement d'un système dans ses conditions d'utilisation habituelles ;

• les systèmes de défaillance qui doivent être prévus. Un système complexe peut avoir des besoins de tolérance aux fautes, par exemple assurer un service minimal dans des conditions de fonctionnement altérées. Les technologies impliquées dans l'ingénierie des systèmes complexes sont, de manière non exhaustive :

- des méthodes de conception, qui doivent être adaptées aux contraintes liées à l'objet lui-même et à la nature souvent pluridisciplinaire et multientreprise de l'équipe de conception. Par exemple, la conception industrielle selon un cycle en V permet de partir de la fonction pour concevoir les sous-systèmes puis les composants, avant de valider en sens inverse composants, sous-systèmes et système global ;

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Technologies et méthodes de production

- des briques logicielles complexes, qui doivent être validées sans laisser de place à des erreurs possibles. Des outils de validation et de vérification de codes performants doivent être mis au point. Le logiciel occupe une part de plus en plus importante dans lesdits systèmes, qu'ils soient répartis ou embarqués ;
- des architectures ouvertes (par exemple SOA : *Service Oriented Architecture*) permettant la détection automatique des éléments composant le système et les services qu'ils offrent, assurant l'indépendance du système vis-à-vis des fournisseurs de technologies ;
- des composants et sous-systèmes électroniques, dont la fiabilité et la durée de vie dans les conditions usuelles d'utilisation doivent être garanties. Cette fiabilité concerne aussi bien le système global que ses composants ;
- tout composant physique utile au fonctionnement du système global ;
- les technologies « molles » de connaissance de l'humain en interaction avec le système (opérateur, usager...). Par exemple, des compétences en psychologie cognitives, en ergonomie, en organisation du travail, etc. sont requises dans la conception du système ; le système étant très majoritairement transparent pour l'humain, son acceptation est fortement dépendante de la perception qu'en a l'utilisateur, et donc de sa facilité d'usage.

Enfin, le problème de la coopération entre différents systèmes autour d'un objectif commun constitue, aujourd'hui, un enjeu important, tant sur le plan économique que scientifique. Cette problématique nécessite de nombreuses compétences qui actuellement sont trop sectorisées.

Enjeux, Impact

La maîtrise des systèmes complexes par les industriels est indispensable au maintien et à l'amélioration des positions de l'industrie française et européenne sur le marché mondial des grands systèmes (transports, espace, finances, santé, énergie...).

Outre cet évident enjeu industriel, l'ingénierie des systèmes (industriels) complexes doit répondre à des enjeux majeurs dans la société actuelle :

- la sécurité des personnes, usagers ou opé-

rateurs de ces systèmes, doit être préservée. Que ce soit en environnement industriel ou en utilisation courante, la complexité des systèmes rend plus difficile la prévision des défaillances. Or la complexité est présente dans de très nombreux systèmes, objets d'enjeux majeurs en termes de sécurité physique des personnes : équipements industriels, énergie (distribution, production...), automobile (véhicule, gestion d'incidents en tunnel, etc.), aéronautique (avions et contrôle aérien), ferroviaire (trains et gestion de la circulation) ;

- la survie économique des entreprises impose une gestion rigoureuse des processus. L'impact en termes d'image, par conséquent en termes d'activité, de défaillances de systèmes mis sur le marché par un industriel, est immédiat. La fiabilité et la sûreté de fonctionnement sont donc des points majeurs pour la compétitivité des industries françaises ;

- le bon fonctionnement d'une grande partie de la société moderne repose sur des systèmes complexes. Les échanges économiques (bourse, cartes bancaires, etc.), la gestion routière, ferroviaire et aérienne, les télécommunications, la défense, l'administration... reposent sur des systèmes complexes dont les défaillances ou les inadéquations à la mission ont des conséquences lourdes sur le fonctionnement de la société.

Marché

Les applications des systèmes complexes sont multiples. Ils entrent dans la constitution d'un grand nombre de systèmes de grande diffusion tels que les véhicules de tous types (automobile, lanceur spatial, avion), des systèmes aussi utilisés que les systèmes de paiement par carte bancaire, les systèmes de commandement des armées, les télécommunications, etc.

Chiffrer le marché des systèmes complexes ne peut se faire qu'à travers leurs applications. Pour les secteurs d'applications visés par le pôle de compétitivité System@tic (transport, sécurité, télécommunications, développement de systèmes), le marché est estimé à 300 Md€.

Degré de diffusion de la technologie

Naissance

Diffusion

Généralisation

Domaines d'application

Industrie pharmaceutique ; industries des équipements du foyer ; industrie automobile ; construction navale ; construction de matériel ferroviaire roulant ; construction aéronautique et spatiale ; autres véhicules ; fabrication de machines de bureau et de matériel informatique ; industries des équipements électriques et électroniques ; services de transports ; activités financières ; postes et télécommunications, administration.

Technologies et méthodes de production

Acteurs

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

■ Compétences technologiques : informatique, analyse, mesure et contrôle, procédés techniques.

■ Pôles de compétitivité : System@tic (Île-de-France) ; Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées).

■ Liens avec (technologies) : réacteurs nucléaires de 3^e génération ; contrôle-commande des réseaux et de la puissance ; sécurité active des véhicules ; architecture électrique des véhicules ; architecture électronique des véhicules ; systèmes aériens automatisés ; gestion des flux de véhicules ; outils et méthodes pour le développement logiciel ; ingénierie des systèmes embarqués ; com-

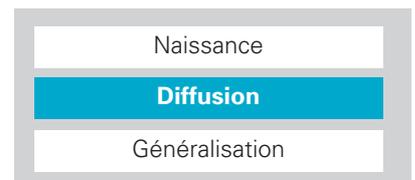
posants et systèmes logiciels ; infrastructures et technologies pour réseaux de communication diffus ; acquisition et traitement de données ; interfaces homme-système ; modélisation, simulation, calcul ; contrôle de procédés par analyse d'image ; capteurs intelligents et traitement du signal ; méthodes et outils de coconception.

■ Principaux acteurs français

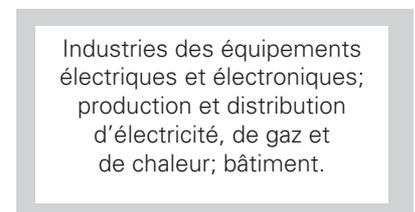
Centre de compétences : Polytechnique, ENS Ulm, université d'Evry-LSC, Cemagref. Industriels : Thales, Renault, PSA Peugeot-Citroën, Dassault, Areva, Atos Origin, Alstom, Airbus, EADS...

■ Exemples d'acteurs dans le monde : Boeing (États-Unis), IBM (États-Unis), Microsoft (États-Unis), Cisco (États-Unis), Samsung (Corée du Sud), Toshiba (Japon), Sony (Japon), NTT (Japon),...

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



Technologies et méthodes de production



83. Transfert de technologie

Degré de développement

Émergence
Croissance
Maturité

Description

Technologie organisationnelle par excellence, le transfert de technologie consiste en un échange de savoir, de techniques ou de savoir-faire d'une organisation à une autre. La diffusion dans le tissu industriel des résultats de recherche publique (laboratoires, universités) est la dimension principale du transfert de technologie. Pour être complet, il convient également de citer le transfert international de technologie, souvent d'une entreprise à une autre, dans le but de prendre pied sur un marché.

Le transfert de technologie ne s'improvise pas. Il nécessite l'utilisation d'un certain nombre d'outils tels que ceux nécessaires pour :

- l'élaboration de la stratégie : analyse du marché potentiel (segments, volumes, dynamisme...);
- l'identification des éléments constitutifs de la technologie objet du transfert ;
- l'analyse de la propriété intellectuelle : marque, droit d'auteur, savoir-faire, dessins et modèles, brevets ;
- la caractérisation du cadre réglementaire et juridique ;
- la recherche et l'identification des licenciés potentiels (dont le « licencié idéal ») ;
- le choix du type de transfert de technologie adapté au contexte et aux objectifs : cession de brevet, concession de licence, communication de savoir-faire, projets de R&D en partenariat, accords de coopération technique, formation, création de joint-ventures, création de spin offs, rachat d'entreprises... ;
- le calcul de la valeur économique du transfert. Ce calcul peut typiquement être fondé sur une combinaison des méthodes suivantes : coûts (historiques de R&D, futurs de R&D, transfert, propriété intellectuelle), potentiel de revenus (marché, marges...),

rentabilité des capitaux investis... ;

- l'ingénierie financière du transfert.

Un des facteurs clés de succès du transfert de technologie réside dans l'ingénierie, et la mise en œuvre coordonnée et multidisciplinaire des outils précédents.

Enjeux, Impact

En 1998, Henri Guillaume rendait les conclusions d'une mission sur la politique en faveur de la technologie et de l'innovation où l'on pouvait lire : « *Notre pays dispose d'un potentiel scientifique et technologique de premier plan, mais le couplage de ces découvertes et de ces connaissances avec les activités industrielles s'effectue moins facilement qu'aux États-Unis et au Japon.* » Force est de constater que ce constat reste d'actualité.

Il serait hasardeux de chiffrer l'impact qu'aurait une augmentation des transferts de technologies entre acteurs publics et privés, tout au plus peut-on raisonner par analogie et observer ce qui se passe ailleurs.

Les experts s'accordent à reconnaître que la situation actuelle de la recherche académique française est comparable à celle des États-Unis dans les années 1980. À cette époque, le gouvernement fédéral américain possédait 28 000 brevets, dont moins de 5 % étaient exploités. Grâce au *Bayh-Dole Act*, adopté en décembre 1980, et permettant aux universités d'exploiter à leur compte les résultats de recherches financées par les agences fédérales et exécutées dans leurs laboratoires, elles peuvent déposer des brevets, en garder la propriété intellectuelle, gérer le transfert de technologie et utiliser les revenus correspondants pour financer leurs recherches. Le *Bayh-Dole Act* a permis une croissance forte des prises de brevets et de la commercialisation d'un grand nombre

Technologies et méthodes de production

de nouvelles technologies. Il a également entraîné une mutation fondamentale dans la pratique de la recherche académique, avec la formation dans toutes les grandes universités américaines de *Technological Transfer Offices* qui vont jouer un rôle majeur dans l'orientation même de la recherche et dans la mise en place des partenariats avec les entreprises privées.

Alors que le PIB par habitant de la France (et de l'Europe continentale) rattrapait celui des États-Unis dans les années 70, force est de constater que la tendance s'est largement inversée. Le transfert de technologie et l'innovation y ont largement contribué.

Le transfert de technologies entre entreprises, notamment international, est quant à lui un atout dans la compétition internationale, dans la mesure où il permet de générer des revenus tout en exportant des standards, des méthodes, plus généralement une culture industrielle.

Prenant conscience de l'importance des enjeux, la Commission européenne a lancé en septembre 2005 une consultation pour la création d'un Institut européen de technologie, dont l'objectif *a priori* est de dynamiser la coopération entre les chercheurs et les entreprises.

Marché

La France souffre globalement d'une insuffisance en matière de transfert de technologie :

- les laboratoires publics, les entreprises et les financeurs n'entretiennent pas les relations de « connivence » indispensables ; nombre d'inventions des laboratoires publics ne sont jamais transférées dans le tissu industriel. Un meilleur transfert de technologie des laboratoires vers les entreprises contribuerait à rapprocher la France des « objectifs de Lisbonne » (3 % du PIB investis en R&D) ;
- le transfert international de technologie, levier déterminant pour la conquête de positions sur les marchés export, n'est que trop rarement utilisé. Cette insuffisance explique, en partie, la dégradation structurelle de la balance du commerce extérieur.

Acteurs

Le rapport d'Henri Guillaume identifie en tant

que « maillons faibles » du dispositif national en faveur de la recherche technologique et de l'innovation :

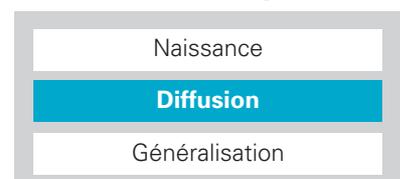
- « *le cloisonnement encore marqué entre l'enseignement supérieur et les organismes de recherche, entre les organismes de recherche eux-mêmes, entre les universités et les écoles d'ingénieurs* » ;
- « *l'insuffisance des investissements en capital-risque, qui couvrent encore mal les premiers stades de la création d'entreprise de technologie* » ;
- « *la complexité du dispositif de transfert et de diffusion de la technologie, qui reste peu lisible pour les PME* ». Le nombre d'acteurs publics ou parapublics du transfert de technologie est en effet important en France : SAIC (services d'activités industrielles et commerciales) des universités, RDT (réseaux de développement technologique), CRITT (centres régionaux d'innovation et de transfert de technologie), CTI (centres techniques industriels), CNRT (centres nationaux de recherche technologique), CEEI (centres européens d'entreprises et d'innovation), Oséo-Anvar, Drire, incubateurs, technopoles, pôles de compétitivité... auxquels viendront s'ajouter les labels « instituts Carnot ».

Des acteurs privés se positionnent également sur le marché du transfert de technologie :

- les investisseurs en capital (AFIC, Association française des investisseurs en capital - www.afic.asso.fr) ;
- les structures de recherche contractuelle, regroupées pour la plupart au sein de l'ARSC (Association des structures de recherche contractuelle - lasrc.net) ;
- les cabinets de conseil spécialisés, tels Vaucher-Tisseront, Développement et Conseil, Nodal, Goyhenetche, Erdyn... Certains de ces cabinets sont adhérents de l'Unatrantec (Union nationale des consultants en innovation et en transfert de technologie - www.unatrantec.asso.fr).

Le réseau européen IRC (*Innovation Relay Centre*) est également spécialisé dans le transfert de technologie, avec des relais locaux (irc.cordis.lu). L'association TII (*Technology Innovation Information* - www.tii.org) regroupe les acteurs du transfert de technologie au niveau européen.

Degré de diffusion de la technologie



Domaines d'application



CONCLUSIONS

ET RECOMMANDATIONS

Les grandes tendances technologiques mises en avant par ce travail de prospective technologique

Au-delà de la description des 83 technologies clés, quelques grandes tendances technologiques ont été mises en évidence par les experts des différents groupes de travail.

Des technologies déjà « connues »

Nombre de technologies que l'on peut qualifier d'« anciennes » figurent parmi les 83 technologies clés 2010. Elles répondent à des enjeux majeurs et contribuent à la compétitivité de la France. Ces technologies, même si elles sont déjà bien « connues », ont insuffisamment progressé ces dernières années, notamment parce que les acteurs ont relâché leurs efforts en raison des prix bas de l'énergie et des matières premières : l'identification de ces technologies comme étant des technologies clés permet d'attirer l'attention sur leur potentiel d'évolution et les enjeux associés. C'est, par exemple, le cas des pompes à chaleur, des moteurs à pistons, des turbomachines, du traitement de surface.

Des technologies de niveau système et des technologies génériques

Partant des grands enjeux économiques et des besoins sociétaux, l'étude a retenu les technologies qui répondent le mieux à ces enjeux et besoins. Il s'agissait, dans un contexte d'intense compétition entre pays, d'identifier des technologies différenciantes pour l'attractivité et la compétitivité françaises. Or, il apparaît qu'un nombre croissant de pays, y compris émergents, maîtrisent des « briques » technologiques, voire sont les leaders mondiaux sur ces « briques » (composants électroniques, écrans plats...). Dans un tel contexte, les pays occidentaux, et la France en particulier, ne peuvent rester compétitifs qu'à la condition de mettre en avant leur maîtrise des systèmes complexes.

En conséquence, la liste des technologies clés 2010 est numériquement plus restreinte que les listes des exercices précédents : 136 technologies clés pour le premier exercice et 119 technologies clés pour le second. Les 83 technologies clés 2010 recensent plus de technologies de niveau « système » : ces technologies incluent de nombreuses « briques » technologiques pouvant être développées ailleurs qu'en France.

Par ailleurs, dans la même optique, il est apparu pertinent de retenir comme clés des « famil-

les » ou des ensembles de technologies - que l'on peut qualifier de « génériques » -, plutôt que de sélectionner des technologies trop spécifiques. C'est ainsi que certaines technologies clés, telles que les matériaux pour l'électronique et la mesure, la gestion de la microénergie, la gestion de l'énergie à bord des véhicules, sont relativement « ouvertes ». À partir de ces technologies clés génériques, il appartient à l'homme de l'art (chercheur, ingénieur) d'élaborer des solutions aux problèmes spécifiques qui lui sont posés.

Des technologies largement diffusantes

Pour des raisons de présentation et de lisibilité, les technologies clés sont présentées suivant des thématiques traditionnelles (TIC, Matériaux-chimie, Bâtiment, Énergie...). Ce classement ne doit pas être considéré de façon « hermétique ». Nombre de technologies sont en effet diffusantes et concernent différents secteurs industriels, comme les technologies de l'énergie, des TIC, des matériaux, ou encore celles contribuant aux différentes dimensions de la sécurité (traçabilité, authentification, RFID). Cette « transversalité » est parfois explicite dans le titre même de la technologie (intégration des ENR dans le bâtiment) mais, généralement, il convient de ne pas s'arrêter au titre et de lire la fiche pour connaître les différentes applications (voir, par exemple, les fiches interface humain-machine, criblage et synthèse à haut débit, turbomachines, capteurs intelligents).

Les technologies clés et les externalités sociales et environnementales

Dans les économies développées de ce début de XXI^e siècle, les exemples d'externalités (situation économique dans laquelle l'action d'un agent économique influe positivement ou négativement sur un autre agent, sans contrepartie financière) négatives sont nombreux :

- ponction sur l'eau et pollution diffuse engendrée par les activités agricoles ;
- pollutions (air, bruit) et contribution aux émissions de gaz à effet de serre des transports ; en plus, pour le cas des transports routiers, congestion et morts sur les routes ;
- charge sur la collectivité des dépenses de soins, même dans les cas où le besoin de soins résulte d'une absence de prévention ou d'une mauvaise hygiène de vie (alimentation, alcool, tabac) ;
- nuisances visuelles, olfactives et sonores engendrées par certains complexes industriels ;
- dégradation de l'environnement électromagnétique engendrée par la multiplication des antennes relais des réseaux de téléphones cellulaires ;
- etc.

Marquant en cela une évolution forte, l'étude *Technologies clés 2010* propose de nombreuses technologies qui permettent de réduire et/ou de « monétariser » les externalités négatives. Plusieurs technologies du domaine de l'énergie et de l'environnement, de l'alimentation, des transports répondent à la préoccupation de la réduction de ces externalités. De même, reposant largement sur l'usage des TIC, des solutions sont proposées pour la monétarisation de ces externalités : il s'agit notamment des technologies qui permettent une tarification à l'usage. Le positionnement et l'horodatage ultraprécis, les infrastructures routières intelligentes ou les technologies de gestion des flux de véhicules, associés aux technologies des télécommunications et du traitement des données, peuvent constituer la « boîte à outils » des autorités et des gestionnaires d'infrastructures pour instaurer, par exemple, des péages urbains ou réguler le trafic sur les axes routiers les plus saturés.

L'importance de la normalisation

Pour un nombre relativement élevé de technologies clés, la normalisation apparaît comme un élément essentiel de la diffusion de ces technologies dans le tissu industriel et comme un facteur de compétitivité des entreprises qui auront su infléchir la normalisation vers leur propre standard.

À l'origine, la construction des normes s'est bâtie en aval de la technique. L'enjeu était d'élaborer *a posteriori* des références et un langage commun afin de favoriser l'interopérabilité, l'interchangeabilité, la compatibilité des équipements sur des domaines techniques matures. La norme permettait d'entériner les meilleures pratiques en y intégrant une dose de retour d'expérience et de réduire la variété en harmonisant des éléments dont la dispersion devenait contraignante ou coûteuse. Les normes de spécifications des matériels dans les domaines électriques ou mécaniques illustrent parfaitement cette logique qui était souvent issue de l'histoire même des technologies (voir l'exemple de l'écartement des voies de chemins de fer).

Désormais, une nouvelle logique d'élaboration des normes tend à supplanter la logique *a posteriori*, en plaçant cette élaboration en amont du déploiement de la technologie. Cette logique est motivée par le fait que, pour rentabiliser des coûts de développement toujours plus élevés, les entreprises aspirent à des normes communes, de plus en plus souvent à l'échelle de la planète. Celles-ci sont en effet la garantie que le marché disposera d'une taille critique.

Établir une norme *a priori*, c'est éviter l'élaboration de référentiels concurrents avec pour corollaire une atomisation de l'offre. C'est aussi s'offrir une possibilité de valorisation et de promotion des innovations ou encore de réduire le risque que des utilisateurs se tournent vers une solution concurrente.

Si cette logique *a priori* conduit à une course de plus en plus effrénée pour conquérir le terrain suffisamment vite pour imposer une technologie qui deviendra une référence indispensable pour une majorité d'utilisateurs, le processus de normalisation est un puissant outil de capitalisation de la connaissance. Ainsi, dans tous les pays industriels, accéder au corpus normatif, c'est accéder au cadre de référence de l'information technique dans tous les secteurs de l'économie et de la technique. Connaître les normes en préparation, c'est également se doter d'une capacité d'anticipation pour préparer son analyse prospective pour imaginer de nouveaux produits, façonner de nouveaux concepts.

La participation à l'élaboration des normes, loin d'être une perte de temps, doit s'appréhender comme un moyen de renforcer la compétitivité de son entreprise.

Les limites de l'étude

La méthodologie de l'étude a conduit à une liste de 83 technologies clés. Élaborée à partir du travail de plus de cent experts, cette liste n'aurait pas été fondamentalement différente si d'autres experts avaient été sollicités. Les critères de sélection des technologies clés ont été choisis pour répondre, au mieux, à la question posée : identifier les technologies susceptibles de procurer à la France un avantage de compétitivité et d'attractivité. Aussi, toutes les technologies importantes pour la France, dans les différentes acceptions possibles du terme, ne figurent pas dans cette liste :

- certaines technologies relatives au domaine de la défense nationale, dont la maîtrise est considérée comme critique pour répondre aux besoins spécifiques de ce domaine, n'appar-

raissent pas, comme la détection et l'analyse NRBC (nucléaire, radiologique, biologique, chimique), les piles à combustibles pour sous-marins, certains matériaux haute température ou les technologies de missiles ;

- certaines technologies annoncées comme devant apporter une véritable rupture, mais pour lesquelles de trop nombreux verrous ne seront pas levés à l'horizon de temps de l'étude, n'ont pas été retenues. Le cas de la pile à combustible illustre ces propos. Pour des applications stationnaires ou de transport, mettant en jeu des puissances de quelques dizaines à quelques centaines de kW, les verrous sont encore si nombreux (disponibilité de catalyseurs, platine ou autre, en quantité suffisante, tenue au vieillissement et au cyclage, logistique de l'hydrogène, analyse du cycle de vie global de l'hydrogène...) que les experts n'ont pas considéré cette technologie comme pouvant être clé à l'horizon 2010. Ce qui n'empêche pas de considérer sérieusement des applications de niche, telles que la gestion de la microénergie ;
- des technologies certainement clés à long terme, comme le nucléaire de 4^e génération, la photovoltaïque « organique » (polymères remplaçant le silicium), la géothermie des roches chaudes fracturées, la fusion nucléaire, les nanorobots médicaux injectables, les ordinateurs quantiques n'ont pas été retenues car leur développement va au-delà de l'horizon calendaire de l'étude.

Même si ces technologies ne figurent pas dans la liste arrêtée par les experts, cela ne signifie pas qu'il faille les laisser pour compte. Les résultats de tout exercice de prospective sont tributaires du référentiel choisi (questions que l'on se pose, horizon de temps visé, ...).

De plus, quelles que soient les précautions méthodologiques mises en œuvre, les études de prospective sont conduites par des hommes et des femmes qui restent, malgré tout, influencés par les préoccupations de l'époque. Ainsi a-t-on pu reprocher à l'étude *Technologies clés 2005*, réalisée en pleine « bulle » Internet, un poids relatif trop important accordé aux TIC et autres « e-technologies ». L'Histoire dira si l'étude *Technologies clés 2010* a été trop influencée par la prise de conscience de l'impact négatif des activités humaines sur l'environnement et par les tensions apparues sur certaines matières premières stratégiques, comme le pétrole ou certains métaux.

Les suites possibles de l'étude Technologies clés 2010

L'exercice technologies clés offre un référentiel et un outil de réflexion qui, comme tout outil, doit évoluer et demande des développements additionnels. Plusieurs experts et membres du comité de pilotage ont appelé de leurs vœux les prolongements, que nous esquissons ci-après et qui représentent, pour chacun, une étude en soi (étude qui permettrait d'approfondir l'analyse des problématiques soulevées).

Les technologies clés et l'Europe

Le premier de ces prolongements, dans la perspective du démarrage, en 2007, du 7^e PCRD, pourrait consister à ancrer les 83 technologies clés dans la dimension européenne. Certes, cette dimension a été largement prise en compte tout au long de l'étude : les ressources bibliographiques exploitées, la présence au sein du comité de pilotage d'un représentant de la Commission l'attestent. Les experts sollicités avaient tous à l'esprit la dimension européenne.

Publiée en septembre 2005 par la Commission européenne, l'étude *Key Technologies for Europe* mériterait d'être analysée à travers le prisme de *Technologies clés 2010*. Il est toute-

fois possible d'aller plus loin, notamment en faisant se rencontrer les experts des deux initiatives, en identifiant des pays leaders sur des technologies spécifiques, en fondant sur les technologies clés identifiées des réseaux et des projets d'innovation à l'échelle européenne.

Les technologies clés, les régions et les pôles de compétitivité

Le démarrage de l'étude *Technologies clés 2010* a coïncidé avec le lancement de l'appel à projets du Gouvernement pour les pôles de compétitivité. À ce jour, 66 pôles de compétitivité ont été labellisés. La politique des pôles de compétitivité est aujourd'hui centrale dans le soutien public à l'innovation. Il a donc paru utile de proposer aux utilisateurs de l'étude une articulation entre les 83 technologies clés et les 66 pôles de compétitivité. Aussi chaque fiche technologie clé contient, dans la partie consacrée aux acteurs, une rubrique « pôles de compétitivité ».

À la lecture des fiches, on constate que la plupart des technologies clés se retrouvent dans un à cinq pôles, alors que huit technologies clés⁽¹⁾ ne sont rattachées à aucun pôle, et que vingt technologies clés sont liées à six pôles ou plus.

Ce constat appelle deux remarques :

- les technologies de niveau « système » ont besoin de « briques » technologiques développées dans différents pôles de compétitivité, ce qui explique que vingt technologies clés ont des liens avec six pôles ou plus. Le risque de l'implication d'un trop grand nombre d'acteurs pourrait toutefois résider dans l'absence de leadership clair sur les technologies clés concernées ;
- inversement, le fait que huit technologies clés ne soient portées par aucun des 66 pôles labellisés mérite une certaine attention. Il conviendra probablement d'orienter les futurs appels à projets de pôles vers ces technologies, afin d'affirmer leur ancrage territorial.

Globalement, il apparaît nécessaire de mieux articuler les pôles de compétitivité et les technologies clés, afin de favoriser l'émergence de pôles clairement leaders sur chaque technologie clé et aussi d'éviter (ou d'assumer) les technologies clés « orphelines » de pôle. Cette analyse doit être naturellement liée aux futures « déclinaisons » régionales des technologies clés qui pourraient être mises en œuvre sous l'égide des Drire, avec le concours des acteurs régionaux de l'innovation.

Les technologies clés, les « systèmes clés » et les « filières clés »

Tout comme avec les pôles de compétitivité, les technologies clés s'articulent avec une autre initiative gouvernementale : les grands programmes d'innovation industrielle de l'Agence pour l'innovation industrielle (All). La contribution de l'étude *Technologies clés* à la définition des axes de travail de l'All s'exprime, notamment, au travers du concept de « systèmes clés ». Sans prétendre à l'exhaustivité, quelques systèmes clés peuvent être proposés à ce stade : réacteur nucléaire de 3^e génération, réseau électrique de transport et de distribution avec production décentralisée, écobâtiment, système agricole « intelligent », réseau ferré « ouvert », TGV 350 km/h silencieux, avion économe et silencieux (post A320), lanceur spatial à coût optimisé, contrôle aérien automatisé, véhicule routier automatisé, système routier intelligent, navire nouvelle génération, système de transports urbains plus rapides, réseau de données très haut débit mobile à bas coût, usine à logiciels, dispositif portable à autonomie augmentée, plate-forme industrielle énergétiquement efficiente...

(1) Il s'agit de : gestion de l'air dans le bâtiment ; gestion de l'eau dans le bâtiment ; capture et stockage géologique du CO₂, mesure des polluants de l'eau ; technologies physiques en amont du traitement de l'eau ; automatisation du tri des déchets ; accélération de la dégradation des déchets fermentescibles ; traitement des odeurs non confinées.

L'approfondissement de ce type d'analyse conduira à recenser les technologies clés nécessaires pour chacun des systèmes clés, en intégrant, en particulier, la dimension européenne. Un autre résultat périphérique de l'étude a été la mise en évidence de plusieurs filières, que nous qualifierons également de clés. L'approche par filière permet de caractériser finement les tenants et les aboutissants de l'environnement d'un produit. Elle permet de mettre en évidence les points forts et les points faibles du système, les acteurs qui interviennent directement ou indirectement dans le système, les synergies, les effets externes, les coopérations, les goulets d'étranglement, les liaisons entre secteurs, le degré de concurrence et de transparence des différents niveaux d'échanges, la progression de la création de valeur tout au long de la filière.

Il s'agit, là, d'un vaste sujet. L'analyse fine de ces filières permettrait de proposer des actions à mener pour renforcer les points forts positifs et estomper les faiblesses. L'articulation entre technologies et filières clés devrait s'appuyer sur les acteurs d'ores et déjà identifiés pour les technologies clés. Quelques filières « candidates » ont émergé lors des débats entre experts : accumulateurs et batteries, combustibles nucléaires, biocarburants, électronique de puissance (silicium, carbure de silicium, diamant), moteurs électriques, matériaux nanostructurés et nanocomposites (dont nanotubes de carbone), biomatériaux (dont bois), filières intégrées de recyclage-réutilisation... Une analyse plus poussée permettrait de conforter et d'enrichir cette liste encore très liminaire.

La mise à jour de l'étude

La dynamique technologique ne s'arrête jamais. Depuis 1995, les exercices Technologies clés ont conduit à une forte mobilisation d'experts durant quelques mois, puis les réseaux constitués pour l'occasion se sont dispersés. Tout au long de l'étude, cette question de la pérennisation des réseaux d'experts a été évoquée, et notamment lors de la réunion « plénière » qui s'est tenue à Bercy, en octobre 2005.

Il ressort de ces débats un fort consensus pour une mise à jour « en continu » de l'étude. Sur le plan pratique, l'environnement technologique mis en œuvre pour le site internet (www.tc-2010.fr) paraît tout à fait adapté à une mise à jour en continu des technologies clés. Toutefois, l'expérience montre qu'une évolution et une animation de ce site sont indispensables pour que ce site « vive ». Cela suppose, notamment, une promotion du site en direction des PME, la tenue à jour de la liste des accès (identifiant, mot de passe), la diffusion périodique d'une « lettre des technologies clés », la diffusion « d'alertes » personnalisées aux experts en cas de contribution dans leur domaine de compétence, etc.

De plus, la constitution d'un « noyau dur » d'experts se réunissant à une fréquence à définir (typiquement deux fois par an) est souhaitable. Par ailleurs, il paraît indispensable de faire vivre le vivier des experts par admission de nouveaux membres ou en actant le retrait de ceux qui ne souhaitent ou ne peuvent plus se mobiliser.

Lors des débats, il est apparu essentiel que cette mise à jour en continu laisse la place à des « temps forts » qui seraient l'occasion d'une large communication vers les acteurs de l'économie et le public. Ces actions de communication pourraient se dérouler tous les deux ans. Le « portage » politique de l'ensemble de cette démarche est également indispensable pour une large adhésion du corps social à l'appropriation des résultats de ces travaux.

Le présent rapport a tenté de restituer, aussi fidèlement que possible, les contributions de la centaine d'experts qui se sont mobilisés pour le succès de l'étude *Technologies clés 2010*, sans oublier les contributions déposées sur le site Internet et les interviews effectuées tout au long de l'étude. Le résultat de ce travail collectif a vocation à être largement diffusé, discuté et critiqué.

ANNEXES

Annexe 1 - Liste des participants au projet

Comité de pilotage

André Lebeau	Président du Comité de pilotage
Agnès Arcier	Minefi/DGE/SPIC
Philippe Boone	Mindef/DAS/SDTP
Hervé Bossuat	Maapr/DGER
Philippe Bourgeois	Minefi/DGE/SPIC
Alain Bravo	Supélec
Antoine Chevet	Hermès
Laurent De Mercey	Rnrt
Elie Faroult	Commission européenne
Paul Friedel	France Télécom
Pierre Georget	Hutchinson
Patrick Haouat	Erdyn
Jean-Pierre Henninot	Minefi/DGE/STSI
Philippe Hirtzman	Commissariat général du plan
Olivier-Pierre Jacquotte	Mindef/DGA
Véronique Lamblin	Futuribles
Richard Lavergne	Minefi/DGEMP
Marcel Lebadezet	Areva
Sami Louati	Minefi/DGEMP
Antoine Masson	Agence nationale de la recherche
Caroline Mischler	MINEFI/DGE/SPIC
Dominique Namur	Commissariat général du plan
Christian Ngo	Ecrin
Jean Nunez	RNRT
Christophe Alexandre Paillard	Mindef/DAS/SDTP
Nicolas Petit	Oséo-Anvar
Grégoire Postel-Vinay	Minefi/DGE/OSI
Claude Ricaud	Schneider Electric
Pierre Rolin	France Télécom
Lionel Segard	Inserm Transfert
Ronan Stephan	CNRS
Pascal Stievenard	Midef/DGA
Jacques Thernier	Minefi/DGE/SIMAP
Jacques Theys	Ministère de l'Équipement

Équipe projet

Consultants

Patrick Haouat	Erdyn
Lionel Algarra	Erdyn
Stéphane Boudin	Erdyn
Justine Derenaucourt	Erdyn
Michel Duhamel	Erdyn
Louis Drouot	Erdyn
Olivier Fallou	Erdyn
Hélène Jacquet	Erdyn
Geoffrey Delcroix	Futuribles
Céline Laisney	Futuribles
Véronique Lamblin	Futuribles
Clément Bourrat	Cybion
Guillaume Lory	Cybion
Calixte Cauchois	Virtuoz
Joël de Rosnay	Biotics

Maîtrise d'ouvrage

Philippe Bourgeois	Minefi/DGE/SPIC - chef de projet
--------------------	----------------------------------

Groupes de travail

Groupe méthode

Khaled Bouabdallah	Université Saint-Etienne
Philippe Bourgeois	Minefi/DGE/SPIC
Alain Bravo	Supélec
Yann Cadiou	Observatoire des sciences et techniques
Thomas Chaudron	Centre des jeunes dirigeants
Nicolas Chung	Association des régions de France
Philippe Clerc	Assemblée des chambres françaises de commerce et d'industrie
Michel Combarous	Académie des technologies
Philippe Daulouede	Sénat
Christian David	L'Expansion
Geoffrey Delcroix	Futuribles
Samuel Douette	Centre des jeunes dirigeants
Maïte Errecart	Institut national de la consommation
François Gérard	Oséo-Anvar
Valérie Guigue Koeppen	Minefi/DGE/SPIC
Patrick Haouat	Erdyn
Mohamed Harfi	Commissariat général du plan
Hélène Jacquet	Erdyn
Véronique Lamblin	Futuribles
Bernard Legendre	Assemblée des chambres françaises de commerce et d'industrie
Lam Fung Ly	Mindef/DGA
Edouard Mathieu	Agence française pour les investissements internationaux
Catherine Moal	L'Usine Nouvelle

Denis Randet	ANRT
Yves Robin	Sessi
Alice Wu	Commission européenne
Philippe Zenatti	Minefi/DGE/SPIC

Services de base

Jean Bonal	Ecrin
Stéphane Boudin	Erdyn
Daniel Clément	Ademe
Robert Cope	CSTB
Jérôme de Dinechin	Serras Thermoélectricité
Bruno de Latour	MDF
Jean-Jacques Doyen	Suez
Louis Drouot	erdyn
Gilles Goaer	Photowatt
Marcel Lebadezet	Areva
Jean Lucas	Cnam
Gines Martinez	Réseau CTI
Jean Claude Mougnot	CEA
Frédéric Muttin	EIGSI
Christian Ngo	Ecrin
Claude Ricaud	Schneider Electric
Guy Sarre	Saft Batteries
Jacques Varret	BRGM

Besoins quotidiens

Valérie Brunel	Biodecision
Geoffrey Delcroix	Futuribles
Jean-Marie Depond	ARIIT Centre
Justine Deregnacourt	Erdyn
Michèle Durand	Centre national de génotypage
Catherine Esnouf	Inra
Patrick Haouat	Erdyn
Louis-Marie Houdebine	Inra
Michelle Jarrigeon	R2ITH
Mark Lathrop	Centre national de génotypage
Éric Seuillet	E-Mergences
Jean-Daniel Sraer	Académie nationale de médecine
NicolesTannières	Oséo-Anvar
Isabelle Vallée	Oséo-Anvar
Jean-Pierre Vors	Bayer Cropscience
Ariane Voyatzakis	Oséo-Anvar
Françoise Xavier	Ecrin et CNRS

Se déplacer

Virginie Augereau	RATP
Jacques Beaumont	Inrets
Jacques Biais	Indicta
Jean Bonal	Ecrin
Gérard Cambillau	SNCF
Robert Csukai	Oséo-Anvar
Pierre Darrort	RATP

Victor Deletang	Fiev
Patrice Desvallées	DPAC
Yan Georget	Koalog
Jean François Gruson	IFP
Patrick Haouat	Erdyn
Éric Jacquet-Lagrèze	Eurodecision
Laurent Jourdainne	Arianespace
Alain Jullien	Alstom Transport
Céline Laisney	Futuribles
Christophe Lèbre	ADP
Gérard-Marie Martin	Valéo
Christian Ngo	Ecrin
Anne-Marie Roy	Gifas
Patrick Savourey	Accor

Communiquer

Bruno Arnaldi	Irisa
Alain Carencu	Alcatel
Benoît Crespin	LMSI - université de Limoges
Guy Dadou	Creativ
Philippe Darche	LIP6
Joël de Rosnay	biotics
Alain Dechatre	CEA
Gabriel Dib	Luceor
Stéphane Elkon	Alliance Tics
Hervé Fanet	Leti
Frédéric Giron	Piere Audouin Conseil
Marc Idelson	BNP Paribas
Hélène Jacquet	Erdyn
Christian Jegourel	Edgecall
Didier Juvin	CEA-LIST
Laurent Kott	Inria
Michel Le Quentrec	Météo France
Jean-Luc Leray	CEA
Jean-François Perret	CNISF
Jean-Paul Pinte	Université catholique de Lille
Ramesh Pyndiah	ENST Bretagne
Ivan Roux	Micro Hebdo
Christophe Schlick	Université Bordeaux 2 (Victor Segalen)
Philippe Silberzahn	Digital Airways
Alan Zeichick	Software Development Times

Semi-produits

Lionel Algarra	Erdyn
Daniel Bernard	Arkema
Michel Bonnemaïson	BRGM
Jean-Marie Dubois	Mines de Nancy
Sylvie Dumartineix	Oséo-Anvar
Éric Gaffet	CNRS
Daniel Gomez	Atip
Jean HANUS	CEA
Jean Jenck	Enki Innovation

Véronique Lamblin	Futuribles
François Laval	CEA
Jean-Claude Lehmann	Saint Gobain
Gines Martinez	Réseau CTI
Dominique Quiniou	BRGM
Francis Teyssandier	CNRS
Véronique Thierry-Mieg	Ecrin
Albert Truyol	CNISF
Michel Vernois	CTBA

Équipements, process et méthodes de production

Jean-Marc Aublant	LNE
Nicolas Beauce	Innovprocess
Christian Caremoli	EDF
Philippe Contet	UNM-FIM
Pierre Devalan	Cetim
Louis Drouot	Erdyn
Céline Dupont-Leroy	Aritt Centre
Benoît Eynard	UTT-LASMIS
Olivier Fallou	Erdyn
Jean-Pierre Gex	Ecrin
Krassimir Krastev	Optics Valley
Jean-Paul Papin	Cetim
Didier Pellegrin	Schneider Electric
Thien-My Phan	Oséo-Anvar
Jean-François Somme	Acmel Industries
Georges Taillandier	AFPR
Arnaud Tanguy	Legris
Serge Ungar	PopSud

Fonctions support

Michel Duhamel	Erdyn
Geoffrey Delcroix	Futuribles
Marc Idelson	BNP Paribas
Thierry Dian-Flon	Crédit Agricole Immobilier
Arlette Mazin	Cnes
Christian Jegourel	Edgecall
Armanda Pais	France Télécom R&D
Philippe Cahen	Opto Opus
Francis Bourrières	Prooftag
Henri Hemery	Thales
François Rivard	Unilog

Outils d'aide à la réflexion

Patricia Auroy	INRA
Bernard Buisson	France Télécom
Calixte Cauchois	Virtuoz
Michaël Denis	ADEV
Jean-Luc Hannequin	Creativ
Patrick Haouat	Erdyn
Patrice Heyde	CCI Rhône-Alpes
Gérard Husson	Mime

Christophe Lèbre	ADP
Guillaume Lory	Cybion
Olivier Nérot	Social Computing
Fabrice Rigaux	Crocis-CCIP
Bernard Rosenzweig	Aritt-RDT Centre
Louis Vedier	AFIC

Acteurs régionaux

Alsace

Séverine Anquetil	Conseil régional Drest
Alain Beretz	Université Louis Pasteur
Christian Blum	Conseil régional (Deco)
Jean Pierre Chambard	Critt Holo3
Alain Dereux	Chambre de commerce et d'industrie Sud-Alsace-Mulhouse
Francis Fischbach	DRRT
Mathilde Follonier	Iconoval
Jean Paul Gaufilllet	Irepa Laser
Roma Grzymala	Rhenaphotonics
Patricia Hautesuer	Ada
François Henne	Semia
Pascale Laurain	DRRT
Carmen Muller	Réseau technologique d'Alsace
Béatrice Payen	Oséo-Anvar Alsace
Alain Strasser	Critt Aerial
Jean Luc Tourmann	Coinseil régional (Drest)
Jérôme Vanmackelberg	Drire Alsace
Tima Wendling	CCI de Colmar et du Centre-Alsace

Centre

Daniel Barbereau	John Deer
Jean Pierre Becquet	Drire Centre
Erik Bentz	CCI de Tourraine
Sébastien Besson	Orléans Technopole
Yolande Boudard	Conseil régional du Centre
Daniel Carton	Hyginov
Arnaud Catinot	Arist-CRCI Centre
Jean-Marie Depont	Aritt Centre
Gérard Dequevauviller	Cetim-Certec
Claude Fleurier	DRRT
Serge Gasnier	Cresitt Industrie
Valérie Harel	Plate-forme technologie
Christophe Lambert	CCI Eure-et-Loire
Sébastien Limousin	Drire Centre
Claude Marchand	Drire Centre
Michel Mesnier	CCI Loir-et-Cher
Patrick Parayre	Oséo-Anvar Centre
Corinne Pauly	CCI Loir-et-Cher
Bernard Rosenzweig	Aritt-RDT Centre
Claude Sautour	Oséo-Anvar Centre

Claude Untrehalt
Michel Villard

CCI de l'Indre
CCI du Loiret

Nord-Pas-de-Calais

Anne Beauval
Marie Bechtet
Cyril BernardeRNARDE
Patrick Bertolo
Jean Claude Carlu
Arnaud Cichowski
Olivier Declerk
Gaétan Mairesse
Patrick Orlans
Chantal Pierrache
Jean Marie Pruvot
Julien Tognola
Christian Traisnel
Christian VINCO

École des Mines
Ciel
Drire Nord-Pas-de-Calais
Digiport
Oséo-Anvar Nord-Pas-de-Calais
Conseil régional (service recherche)
IEMN Transfert
DRRT
Cetim
Conseil régional (DAE)
RDT
Drire Nord-Pas-de-Calais
Centre de développement des éco-entreprises
Drire Nord-Pas-de-Calais

Rhône-Alpes

Bérengère Fournel
Gilles Rouchouse
F. Wendling
E. Filliol
B. Micand
O. Whitechurch
M. Barq
H. Montes
David Pigot
Gérard Goubault de Brugères
Bertrand Georjo
Marc Rohfritsch
Philippe Sauvage
Jean-Marie Lemahieu
Emmanuel Cantèle

Présence Rhône Alpes
Cetim
Aratem
Oséo-Anvar Rhône Alpes
Arteb
Arteb
Pôle européen de plasturgie
Conseil régional
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes
Drire Rhône-Alpes

Annexe 2 - Bibliographie sommaire

Documents transversaux aux secteurs d'activité

- European Business, facts and figures 1998-2002, Eurostat
- *Key technologies for Europe*, Commission européenne, septembre 2005 (www.cordis.lu/foresight/key_tech.htm)
- *European Foresight Monitoring Network* - www.emfn.info
- *Fiches de présentation synthétique des Pôles de compétitivité labellisés* - CIADT du 12 juillet 2005
- *Technologies du futur - Enjeux de société*, Ecrin, 2005
- *Pour une nouvelle politique industrielle*, Jean-Louis Beffa, 2005
- *Pour un écosystème de la croissance*, Christian Blanc, rapport au Premier ministre, 2004
- *Opération Futuris*, ANRT (www.anrt.asso.fr), 2003-2005
- *Converging Technologies - Shaping the future of European Societies*, Commission européenne, 2004
- *Principaux enjeux et verrous scientifique au début du XXIe siècle*, *Synthèses des rapports sur la science et la technologie*, Académie des sciences, Avril 2004

TIC

- *Digiworld 2005*, publication Idate, 2005
- *Livre Bleu : grands programmes structurants*, Propositions des industries électroniques et numériques, juillet 2004
- *Économie du logiciel : renforcer la dynamique française*, Rapport du groupe de travail présidé par Hugues Rougier - Commissariat général du plan, octobre 2002
- *Le logiciel libre : mythes & réalité*, Perspectives technologiques & Opportunités stratégiques, PAC Vision, 2005
- *ITEA Technology Roadmap for Software-Intensive System*, édition 2, Rapport du réseau européen ITEA, 2004
- *Productivité : les États-Unis distancent l'Europe*, Cette Gilbert, Futuribles n° 299, 2004
- *MEDEA+ Applications Technology Roadmap*, Vision on Enabling Technologies of the future MEDEA+ Programme, 2003
- *2003 Technology Survey (IEEE)*, APPLEWHITE Ashton, IEEE Spectrum, janvier 2003

Semi-produits

- *The vision for 2025 and beyond, A European technology platform for sustainable chemistry*, Cefic/EuropaBio, 2005, www.suschem.org
- *SusChem - Draft Strategic Research Agenda Reaction & Process Design*, Cefic/EuropaBio, 15/06/2005
- *SusChem - Developing a Strategic Research Agenda for Industrial Biotechnology*, EuropaBio/ESAB, 13/06/2005, working doc.
- *Avenir de l'industrie chimique en France à l'horizon 2015*, Groupe de réflexion stratégique (Pdt : Député D. Garrigue), mai 2005

- *Smart materials for the 21st century*, Smart Materials Taskforce of the Foresight Materials Panel (Royaume-Uni), 2004, www.iom3.org/foresight
- *Functional materials, future directions*, Functional Materials Taskforce of the Foresight Materials Panel (Royaume-Uni), 2004, www.iom3.org/foresight
- *Les enjeux des nouveaux matériaux métalliques*, Christian Hocquard, Géosciences, n°1, janvier 2005, p. 6 - 11
- *Products and processes for a sustainable chemical industry : a review of achievements and prospects*, Jean F. Jenck et al., Green Chem., 2004, n°6, p. 544 - 556

Construction, génie civil, habitat

- *Challenging and changing Europe's built environment: a vision for a sustainable and competitive construction sector by 2030*, European Construction Technology Platform, février 2005
- *Strategic Research Agenda for the European construction sector*, European Construction Technology Platform, juin 2005

Énergie, environnement

- *Nouvelles technologies de l'énergie*, rapport préparé sous la direction de Thierry Chambolle, 2004
- *Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle*, communication à l'Académie des technologies, 2005
- *Key tasks for future European energy R&D*, Commission européenne, 2005
- *113 technologies dans le domaine de l'environnement*, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, 2004
- *European vision for water supply and sanitation in 2030*, Water Supply and Sanitation Technology Platform, juin 2005
- *Promouvoir les technologies au service du développement durable: plan d'action de l'Union européenne en faveur des écotechnologies*, communication de la Commission européenne, janvier 2004

Besoins quotidiens

- *PharmaFrance 2004 : S'inspirer des politiques publiques étrangères d'attractivité pour l'industrie pharmaceutique innovante*, Antoine Masson, Conseil général des mines, mai 2004
- *Rapport sur l'attractivité de la France pour les industries des biens de santé*, Jean Marmot, 12/05/2004
- *Synthèses OCDE : Textile & Vêtements*, novembre 2004
- *La place des biotechnologies en France et en Europe*, Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifique et technologique, Jean-Yves Le Déaut, 27/01/2005
- *Rapport sur les enjeux des essais et de l'utilisation des organismes génétiquement modifiés*, Rapport de la mission d'information sur les enjeux des essais et de l'utilisation des organismes génétiquement modifiés, Jean-Yves Le Déaut, 13/04/2005

- *Biomédicaments en France, État des lieux 2004*, Étude du Comité biotechnologique du Leem, Karim Ibazatene, juin 2005
- *Biotechnologies : Emploi, métiers et formation*, Étude du Leem, septembre 2005

Transports

- *Strategic Research Agenda, Ertrac (European Road Transport Research Advisory Council)*, 2004
- *Proposition pour fédérer les stratégies de déploiement des ITS en France*, ITS France, juin 2005
- *Strategic Rail Research Agenda 2020, ERRAC (European Rail Research Advisory Council)*, 2002
- *Strategic Research Agenda 2020, ACARE (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe)*, 2002
- *Agora 2020*, Centre de veille et de prospective du ministère de l'Équipement, www.equipement.gouv.fr/recherche/pvs/CPVS6/activites_recherche_agora2020.htm

Équipements, process et méthodes de production

- *International technology roadmap for semiconductors: 2004 update*, Sematech ITRS, 2004
- *A method for analysing collective design processes*, Françoise Darses et al, rapport de recherche Inria 4258, septembre 2001
- *Livre blanc sur l'optique : bilan des forces et faiblesses de l'optique en France*, 2004
- *La biophotonique française, perspectives de développement*, OpticsValley, juin 2003
- *Rapport sur l'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies*, sénateur Claude Saunier, rapport de l'OPECST n°244
- *Vision 2020. Nanoelectronics at the center of change*, Commission européenne, rapport du High level group on nanoelectronics

Annexe 3 - Priorités technologiques d'autres pays

Les exercices de prospective d'autres pays ont été présentés sous l'angle de la méthode dans l'introduction du présent rapport. Les principaux axes prioritaires de recherche, ou technologies clés, retenus à l'issue de ces études sont présentés ci-dessous.

Allemagne

L'exercice allemand, à l'initiative du ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche, est fondé sur quatre *guiding visions* :

- comprendre les processus de la pensée : sur la base de l'étude de l'extrême complexité du cerveau humain, un ensemble de technologies sont développées. À titre d'exemple, on cite : algorithmes et raisonnements informatiques, principe du codage des neurones, architecture informatique, robotique autonome, capteur ;
- la santé par la prévention : il s'agit d'assurer une excellente qualité de vie à l'ensemble des individus et groupes sociaux, et de réduire les inégalités sociales face aux soins. Les priorités de recherche sont les suivantes :
 - collecte et évaluation systématique des données, nouveau type de diagnostic ;
 - système de prévention précoce ;
 - authentification de données relatives aux patients ;
 - protection et stockage des données ;
 - développement et fabrication de capteurs ;
 - développement de diagnostics génétiques ;
 - techniques d'implémentation de solutions techniques ;
 - acceptabilité et éthique ;
- vivre dans un monde en réseau individuel et sûr : les principaux axes de recherche sont les suivants :
 - interfaces homme-machine, dispositifs mobiles ;
 - systèmes embarqués ;
 - logiciels ;
 - réseau et structure de fourniture de services ;
 - sécurité : protection de la communication, authentification ;
- accès libre à l'enseignement : il s'agit ici de concevoir un monde capable de proposer un accès libre à l'enseignement et à la connaissance. Le volet technologique de cet objectif est moindre comparativement au volet de gestion et d'organisation (réseaux de sites d'éducation,...). Le e-learning est cependant directement concerné par cet axe de recherche.

Royaume-Uni

Le Royaume-Uni, dans son troisième cycle de prospective technologique (*round 3*), cible plusieurs projets de recherche. Quelques projets ayant « livré » leurs résultats sont présentés ci-dessous, ainsi que les axes prioritaires de chacun.

- prévention de la cyber-criminalité :
 - technologies pour la surveillance et la vie privée ;
 - technologies pour les services web interopérables ;
 - plate-forme de travail sûre (notion d'inviolabilité, d'inaffabilité) ;
 - infrastructures (sûreté sur l'ensemble du réseau) ;

- exploitation du spectre électromagnétique :
 - technologies optiques de transfert de données ;
 - procédés de fabrication par laser ;
 - technologies champ proche ;
 - imagerie non-intrusive ;
- sciences liées au cerveau (en relation avec les problématiques de traitements médicamenteux et de toxicomanie) :
 - génétique et génomique ;
 - économie ;
 - psychologie expérimentale ;
 - sciences sociales : sociologie, psychologie, histoire sociale, épidémiologie, anthropologie,...) ;
 - éthique ;
 - psychologie clinique.

Espagne

L'Espagne a fixé ses axes de recherche prioritaires sur les domaines suivants :

- agroalimentaire ;
- énergie ;
- environnement ;
- chimie ;
- technologie de l'information et des communications ;
- transport ;
- transformation et fabrication ;
- industrie traditionnelle : textile, chaussure, jouets, bois et meubles, verre et céramique, bijouterie).

États-Unis

Lors de l'exercice *New force at work*, les technologies « critiques » (*critical technologies*) retenues par les États-Unis sont les suivantes :

- technologies transversales :
 - logiciel ;
 - microélectronique et télécommunications ;
 - technologies avancées pour l'optimisation des process de fabrication ;
 - matériaux ;
 - capteurs et technologies de l'image ;
- technologies d'interface :
 - technologies de séparation (tri et filtration,...) ;
 - technologies de révision et de réparation (ex : maintenance et réparation de logiciel) ;
 - systèmes de coordination pour la production de produits complexes.

Canada

Le Canada a focalisé ses travaux vers deux thèmes précis : la « géostratégie » et la « biosystème ».

Le thème « géostratégie » propose la convergence des axes de recherche suivants :

- biomédecine, robotique, intelligence artificielle, nanotechnologies (Brain) ;
- réseau électronique terrestre: micro et nanocapteurs, technologie de l'information, communication sans fil, systèmes géospatiaux ;
- prévision météorologique et gestion des risques, capteurs en réseau, observation temps réel, infrastructure numérique de la surface terrestre ;
- transfert de technologies militaires vers des applications civiles.

Le thème « biosystémique » rassemble les axes de recherche suivants :

- écologie et son impact sur les sciences des matériaux ;
- épidémiologie ;
- biotechnologies, bioinformatique ;
- technologies de l'information, technologies cognitives ;
- génie génétique ;
- semi-conducteurs, photonique ;
- génomique ;
- nanotechnologies.

Japon

Les résultats de la dernière étude Delphi du Japon (projection à trente ans) ont mis en avant les technologies suivantes (selon les six principaux thèmes initiaux, regroupant 100 technologies) :

- 3 thèmes sont considérés comme prioritaires :
 - science de la vie, santé et agriculture ;
 - informatique, électronique ;
 - terre et mer, espace, ressource et environnement ;
- 3 thèmes sont classés en seconde position :
 - matériaux ;
 - fabrication, distribution, business ;
 - urbanisation, transport et services.

Chine

Les priorités de la Chine, identifiées lors de son dernier exercice de prospective, sont les suivantes :

- technologies de l'information et des communications :
 - logiciel ;
 - ordinateurs ;
 - sécurité de l'information et des réseaux ;
 - circuits intégrés ;
 - techniques audio et vidéo ;
- sciences de la vie et ingénierie :
 - technologie pour l'agriculture biologique ;
 - biomédecine ;
 - sciences de la vie ;
 - biologie environnementale et industrielle ;
- nouveaux matériaux :
 - matériaux de structure ;
 - matériaux fonctionnels ;
 - matériaux pour l'informatique et l'électronique ;
 - nanomatériaux.

Annexe 4 - Les technologies « candidates »

Le « vivier » des technologies candidates pour être clés était composé de 251 technologies :

- 119 technologies clés 2005 ;
- 132 technologies proposées au cours de l'étude, soit directement sur le site Internet *www.tc-2010.fr*, soit par les experts au cours des réunions thématiques, soit par l'équipe projet.

Ces 251 technologies ont fait l'objet d'un examen systématique par les experts, sur la base des critères définis au début de l'étude.

Le tableau ci-dessous récapitule le statut de l'ensemble des technologies envisagées comme « candidates » pour être clés. Les colonnes « statut » et « N° TC 2010 » du tableau s'interprètent comme suit :

- il y a trois statuts possibles pour une technologie candidate :
 - TC 2010 : la technologie candidate a été retenue comme technologie clé ;
 - I : la technologie candidate n'a pas été jugée clé comme telle, mais elle a été intégrée dans une technologie clé 2010 de portée plus vaste (système, famille) ;
 - NR : la technologie candidate n'a pas été retenue comme clé ;
- la colonne « N° TC 2010 » rappelle la référence de la (ou des) technologie(s) clé(s) 2010 dans laquelle se retrouve la technologie candidate. Nota : il se peut que certaines technologies classées « NR » se retrouvent toutefois traitées, marginalement, dans une technologie clé : dans ce cas, la colonne « N° TC 2010 » comporte le numéro de référence de la technologie clé concernée.

N°	Technologie clé 2005	Statut	N° TC 2010
1	Microélectronique silicium		77
2	Microtechnologies - Microsystèmes		77,80
3	Microélectronique III V (AsGa, InP,...)		19
4	Capteurs intelligents	TC 2010	75
5	Mémoires de masse	I	2
6	Composants optoélectroniques et photonique	I	78
7	Composants d'interconnexion et d'interface	I	9
8	Capteurs de vision ou capteurs d'image	I	11,55,74,75
9	Écrans plats	NR	17
10	Équipements et matériaux pour salles blanches, robotique	NR	
11	Batteries et gestion de la microénergie	TC 2010	1
12	Objets communicants autonomes (identifiants intelligents, étiquettes)	TC 2010	4,9
13	Assistants digitaux portables	NR	
14	Technologies logicielles pour les systèmes temps réel ou contraint	I	6,7
15	Technologies logicielles de la langue et de la parole	I	13
16	Infrastructures pour réseaux dorsaux haut débit	I	9
17	Technologies de boucle locale	I	8
18	Technologies logicielles pour le transport de données	I	9
19	Réseau domestique numérique	I	8
20	Technologies logicielles pour la sécurité des réseaux	I	10

21	Intermédiation et intégration de services pour l'Internet du futur	I	13
22	Grands serveurs	I	12,15
23	Transmission temps réel de contenus multimédias	I	12
24	Technologies logicielles pour la gestion des données et du contenu	I	11,12,13
25	Systèmes auteurs pour la création de contenu multimédia	I	12,13
26	Technologies logicielles de réalité virtuelle	I	16
27	Technologies logicielles de l'informatique distribuée	I	7,9,13
28	Génie logiciel	I	7
29	Ingénierie des grands systèmes complexes	I	82
30	Mesure et test de systèmes	I	6
31	Alliages de polymères	NR	
32	Nanocomposites et renforts nanométriques	I	18
33	Matériaux pour systèmes avancés (piézoélectriques, ferroélectriques et magnétiques)	I	19
34	Matériaux absorbants de chocs, de vibrations, de bruit, de chaleur	I	24
35	Matériaux pour procédés en milieux extrêmes (hautes températures, froid,...)	I	24
36	Fibres textiles fonctionnelles	I	25
37	Catalyseurs	I	20
38	Ingénierie et traitement des surfaces	TC 2010	79
39	Procédés biotechnologiques et biomimétiques de synthèse de minéraux et polymères	I	21
40	Procédés de mise en œuvre et de formulation de la matière molle	NR	
41	Élaboration de composites à matrice organique	NR	
42	Surveillance intelligente de l'élaboration et de la mise en œuvre des matériaux	NR	74
43	Évaluation non destructive de l'endommagement des matériaux et des assemblages	NR	24
44	Fabrication en petites séries à partir de modèles numériques	I	81
45	Modélisation complète de la transformation des matériaux et intégration dans des bases de données	NR	15
46	Modélisation moléculaire des polymères	I	15,49
47	Techniques de synthèse et des tests haut débit	TC 2010	49
48	Systèmes performants pour enveloppe de bâtiment	TC 2010	26
49	Techniques de diagnostic des structures	NR	
50	Technologie de déconstruction	NR	
51	Conception et mise en œuvre des ouvrages dans une logique de développement durable	I	28,29,30
52	Ingénierie concurrente	I	81
53	Réalité virtuelle augmentée pour la conception architecturale et technique	I	15,16
54	Gestion de l'air dans les bâtiments	TC 2010	28
55	Réduction des bruits	NR	64
56	Béton à performances optimisées	I	24
57	Matériaux composites pour les routes (les enrobés)	I	56
58	Technologies de travaux souterrains	I	57

59	Off shore grands fonds	NR	
60	Robotique mobile en milieu hostile	I	56, 69
61	Stockage de l'énergie	I	1, 31, 32, 67
62	Pile à combustible	NR	1
63	Microturbine	I	1
64	Éolien offshore	I	32
65	Photovoltaïque	I	31
66	Éclairage et visualisation à basse consommation	TC 2010	36
67	Supraconducteur	NR	
68	Piégeage et stockage du CO ₂	I	37
69	Conditionnement - entreposage et stockage des déchets nucléaires à vie radioactive longue	NR	34
70	Fluides frigorigènes à haute qualité environnementale	NR	
71	Stabilisation en vue du stockage et de l'utilisation écocompatibles des déchets ménagers et industriels	NR	56
72	Recyclage de matériaux spécifiques	TC 2010	23
73	Élimination des métaux lourds dans les boues et les effluents	NR	
74	Filtration membranaire	I	40
75	Développement des techniques de diagnostic et de traitement des sols	NR	
76	Outils de gestion et d'évaluation des risques environnementaux et sanitaires	NR	
77	Ingénierie des protéines	I	46
78	Transgénèse	TC 2010	44
79	Détection et analyse des risques pour l'environnement lié aux OGM	I	44
80	Thérapie génique	TC 2010	47
81	Clonage des animaux	NR	
82	Criblage de molécules	I	49
83	Grefte d'organe	NR	
84	Thérapie cellulaire	TC 2010	45
85	Organes bioartificiels	NR	
86	Imagerie médicale	I	55
87	Chirurgie assistée par ordinateur	I	16,55
88	Miniaturisation des instruments de recherche médicale	I	55
89	Traçabilité	TC 2010	73
90	Marquage métabolique des aliments	I	72
91	Technologies « douces » pour la préservation de la qualité des aliments	I	53
92	Biocapteurs, biopuces	I	49
93	Architecture électrique	TC 2010	65
94	Architecture électronique - informatique répartie et multiplexage dans les véhicules	TC 2010	66
95	Compatibilité électromagnétique	NR	
96	Composants électroniques de moyenne puissance	I	65
97	Sûreté des systèmes (embarqués et des infrastructures)	I	6, 82
98	Ergonomie de l'interface homme-machine	I	14
99	Amélioration des performances énergétiques d'ensemble des véhicules	I	67, 60

100 Véhicules intelligents et communicants	NR	59
101 Moteurs thermiques	TC 2010	62, 63
102 Amélioration du coût et des performances des lanceurs spatiaux	NR	
103 Outils de personnalisation de la relation client	I	11
104 Agents intelligents	I	7,13
105 Offre de produits et de services de grande consommation à base de réalité virtuelle	I	16
106 Outils de santé à la disposition des consommateurs	NR	
107 Design sensoriel y compris la métrologie sensorielle	NR	
108 Méthodes de marketing liées à l'utilisation des TIC	NR	
109 Systèmes d'organisation et gestion industrielle améliorés	NR	81
110 Formalisation et gestion des règles métier	NR	
111 Outils d'aide à la créativité	NR	
112 Représentation de la perception du consommateur	NR	
113 Simulation, modélisation du comportement humain (dans le poste de travail, face au produit...)	I	15
114 Multireprésentation des objets virtuels - qualité de la représentation	I	16
115 Simulation numérique des procédés	I	15
116 Représentation et gestion des processus de l'usine numérique	I	15
117 Prototypage rapide	NR	
118 Supply Chain Management	NR	
119 Soutien logistique intégré	NR	

Les technologies candidates proposées au cours de l'étude

N° Technologie clé 2005	Statut	N° TC 2010
120 Matériaux composites nanostructurés	TC 2010	18
121 Assemblage structural par collage	I	76
122 Procédés innovants (usinage grande vitesse, usinage jet d'eau, revêtements, outils de coupe)	I	80
123 Panneaux solaires photovoltaïques	I	31
124 Turbo Codes (applications télécoms)	I	9
125 Pilotage de processus collaboratifs (cf. systèmes complexes)	I	81,82
126 Opérations réseaux-centrées (applications militaires)	I	8
127 Logiciels répartis, logiciels scientifiques (communication entre ordinateurs, b to b, grilles de calculs)	I	9,15
128 Alimentation végétarienne	NR	
129 Les réseaux bayésiens (intelligence artificielle, aide à la décision)	I	13
130 Programmation par contraintes (optimisation combinatoire)	I	15,71
131 Programmation orientée aspect (AOP) (concevoir ces logiciels « par fonctions »)	I	7
132 Web sémantique pour l'éducation	I	13

133	Mise en œuvre - Assainissement - Pressurisation de circuits en ambiance cryogénique	NR	
134	MDA (Model Driven Architecture, une technologie de génie logiciel)	I	7
135	Méthodologie de conception et d'innovation (volet SHS en complément des SPI)	I	81
136	Domotique	NR	
137	Processeurs asynchrones (modifications architecturales fines)	NR	3
138	Communication (plate-forme de veille pédagogique pour le e-learning)	I	13
139	Modélisation de la cellule vivante - chaînage d'action des services web, applications et librairies	I	7,15
140	LED de puissance pour éclairages public et technique	I	36
141	Logiciels de traduction automatique	I	13
142	Règles explicatives (intelligence artificielle)	I	13
143	Mousses métalliques et/ou structures alvéolaires	I	24,60
144	TAPP : Transactional Access Point Protocol		5
145	Batteries lithium-ion	I	31, 32, 67,71
146	RSS (syndication et agrégation de contenus multimédias)	I	12
147	Technologies de génomique fonctionnelle à grande échelle appliquées à l'étude des maladies	TC 2010	48
148	Le code à bulles : solution de lutte contre la contrefaçon des produits et la falsification des documents.	I	72
149	Coconception	TC 2010	81
150	Barrage flottant antipollution	NR	
151	Technologie domotique et de services pour l'habitat	NR	
152	Les réseaux « Mesh » de maillage et de routage dynamique de réseaux sans fil	I	8
153	Bio-santé	NR	
154	Intégration électronique de puissance	I	65, 67
155	Génération électrique par thermoélectricité	NR	
156	RFID identification par la radiofréquence	I	4
157	ORBIman : réseaux métropolitains à QoS (hauts débits, sécurité...) contractualisables	I	9
158	Systèmes cellulaires pour la sélection de gènes et d'agents anticancéreux (criblage)	I	49
159	Matériaux souples pour stockage d'eau	NR	
160	Connexion sans fil très haut débit	I	8
161	Conversion directe optique-radio	I	78
162	Rafraîchissement d'images haute définition	I	12
163	Circuits souples intégrés	I	3,17
164	Capteurs répartis	I	75
165	Multisensorialité	I	14
166	Énergie portable	I	1
167	Projection miniaturisée	I	17
168	Papier, stylos et supports électroniques	NR	
169	Observations satellitaires radar en zone urbaine et périurbaine (interférométrie)	NR	
170	RFID en environnement métallique	I	4

171	Recyclage multimétaux par biotraitement des produits TIC en fin de vie	I	23
172	Accélération de la dégradation des déchets fermentescibles et valorisation énergétique	TC 2010	42
173	Réfrigération magnétique pour les marchés industriels et grand public	NR	
174	Moteur à air comprimé pour véhicules de tout type (camions, voitures de tourisme)	NR	
175	Gestion et préservation des ressources en eau souterraine	I	39,40
176	Petits véhicules aériens automatiques et autonomes	I	69
177	Inexpensive Broadband Access and interconnection	I	8
178	White Leds [light-emitting diodes]	I	36
179	Alternate Gate Dielectrics	I	19
180	Low-Cost Artificial Intelligence	I	13
181	Molecular Imaging	I	55
182	Open-Source Operating Systems	NR	
183	The Integration of biology and engineering	I	49
184	Applications de Galileo	TC 2010	70
185	Outil d'aide à la décision pour une meilleure politique de gestion des déchets municipaux	NR	
186	Traçage isotopique des sources de pollution atmosphérique (particules et gaz)	NR	
187	Measurement of innovation in the service industry	I	83
188	Les textiles intelligents	I	25
189	Géothermie haute enthalpie pour production d'électricité	NR	
190	Détection de résidus de substances médicamenteuses et pharmaceutiques	I	39
191	Techniques de spéciation des métaux	NR	
192	Outils de modélisation pour l'intelligence collective (systèmes complexes)	I	82
193	Catalyse homogène combinatoire	I	20
194	Géothermie EGS - production d'électricité à partir des roches chaudes et fracturées - concept EGS (<i>Enhanced Geothermal Systems</i>)	NR	
195	Géothermie décentralisée - production d'électricité et de chaleur à partir de réservoirs moyenne température	NR	
196	TIC - applications Internet mutualisées - gestion d'infrastructures	NR	
197	Sondes géothermales pour pompes à chaleur	I	35
198	Géostructures énergétiques	I	35
199	Stylo numérique	NR	
200	Architectures orientées services	I	5
201	Technologies de lutte contre la contrefaçon	I	72
202	Operating System Open Source vs. Microsoft	NR	
203	Loi de Moore sub-45 nanomètres 2010 - Sources optiques puissantes à 13 nanomètres (100 electron-volts) et optiques en rayons X pour la lithographie extrême UV	I	77,78
204	Objet sensible	NR	
205	« Intelligence minérale » pour une gestion durable des ressources minérales	NR	
206	Utilisation rationnelle des énergies	I	

207 Reprendre le contrôle de l'ordinateur portable par le biais du téléphone portable	NR	
208 Conception assistée par ordinateur	I	15
209 Personnalisation (customisation) pour l'habillement	NR	
210 Développement des textiles destinés à des usages techniques	TC 2010	25
211 Développement durable pour le textile	I	25
212 Nanotechnologies appliquées au textile	I	25
213 Biotechnologies pour le textile	I	25
214 Moyens préventifs de lutte contre tous types d'inondations	NR	
215 Signature électromagnétique des composants du vivant	NR	
216 Toiture solaire à moyenne concentration	I	30
217 Moteur électrique et alternateur à aimant permanent et électronique associée	I	67
218 Production d'un substitut du gasoil à partir de la biomasse lignocellulosique	I	33
219 Générateur électrique à piston libre et combustion à très haute température	I	62
220 Éoliennes off shore flottantes multi-rotors	NR	
221 Production d'électricité avec des capteurs à moyenne concentration	NR	
222 Liquéfaction de la biomasse lignocellulosique par hydrothermolyse flash	I	33
223 Aide à la créativité	NR	
224 Lean management	NR	
225 E-PLI	NR	
226 Systèmes pour la production d'électricité en période de pointe ou de crise	NR	
227 Automatisation des systèmes ferroviaires	NR	
228 Antennes	I	75
229 Sécurité de fonctionnement	I	6,82
230 Liaisons sans fil sécurisées	I	10
231 Informatique contextuelle	I	8,11
232 Manipulation de contenus multimédias	I	12
233 Outils de veille et d'intelligence économique et gestion des connaissances	I	13
234 Intégration d'applications d'entreprise	I	5,7
235 Logiciels pour l'éducation et la formation	I	13
236 Terminal multistandard (numérique, analogique)	I	9
237 Visualisation d'informations et de données complexes (y compris réalité virtuelle)	I	14, 16, 17
238 Reconnaissance de caractéristiques biologiques	I	72
239 Cryptographie pour l'authentification	I	10
240 Méthodes et processus de soutien à l'innovation	I	83
241 Architecture des ressources humaines de l'entreprise	NR	
242 Authentification par des éléments générés par un processus de chaos	I	72
243 Technologies logicielles pour la sécurité des réseaux	I	10
244 Technologies d'identification de produits, sans contact (RFID)	I	4

245 Détection et analyse NRBC (nucléaire, radiologique, biologique, chimique)	NR	
246 Ordinateurs quantiques	NR	
247 Ingénierie financière de l'innovation et du développement	I	83
248 Veille pédagogique	I	13
249 Outils de formation aux sciences et aux techniques	NR	
250 Systèmes autoapprenants pour l'aide à la décision	I	13
251 Logiciels de traduction automatique et mémoire de traduction	I	13

Annexe 5 – Liste des disciplines scientifiques

Biochimie
Biologie moléculaire
Biologie cellulaire
Biologie des organismes
Sciences médicales et alimentation
Physico-chimie de la pharmacologie
Neurosciences
Médecine et odontologie
Biologie des populations et écologie
Chimie physique
Chimie analytique
Chimie moléculaire
Chimie du solide
Matériaux
Physique théorique
Optique
Physique des constituants élémentaires
Physique des milieux dilués
Physique des milieux denses
Sciences des milieux naturels (terre, océans, atmosphère)
Astronomie, astrophysique
Énergétique
Mécanique des fluides
Génie des procédés
Mécanique
Génie des matériaux
Génie civil
Informatique
Automatique
Traitement du signal
Électronique
Photonique
Optronique
Mathématiques et leurs applications
Sciences du langage
Psychologie
Sociologie
Démographie
Droit et sciences politiques
Économie et gestion
Géographie et aménagement

Annexe 6 - Liste des compétences technologiques et codes CIB

Électronique - électricité

Composants électriques	F21 ; G05F ; H01B, C, F, G, H, J, K, M, R, T ; H02 ; H05B, C, F, K
Audiovisuel	G09F, G ; G11B ; H03F, G, J ; H04N, R, S
Télécommunications	G08C ; H01P, Q ; H03B, C, D, H, K, L, M ; H04B, H, J, K, L, M, Q
Informatique	G06 ; G11C ; G10L
Semi-conducteurs	H01L ; B81

Instrumentation

Optique	G02 ; G03B, C, D, F, G, H ; H01S
Analyse - mesure - contrôle	G01B, C, D, F, G, H, J, K, L, M, N, P, R, S, V, W ; G04 ; G05B, D ; G07 ; G08B, G ; G09B, C, D ; G12
Ingénierie médicale	A61B, C, D, F, G, H, J, L, M, N
Techniques nucléaires	G01T ; G21 ; H05G, H
Chimie - matériaux	
Chimie organique	C07D, F, G, H, J
Chimie macromoléculaire	C08B, F, G, H, K, L ; C09D, J
Chimie de base	A01N ; C05 ; C07B ; C08C ; C09B, C, F, G, H, K ; C10B, C, F, G, H, J, K, L, M ; C11B, C, D
Traitements de surface	B05C, D ; B32 ; C23 ; C25 ; C30
Matériaux - métallurgie	C01 ; C03C ; C04 ; C21 ; C22 ; B22 ; B82

Pharmacie - biotechnologies

Biotechnologies	C07K ; C12M, N, P, Q, S
Pharmacie - cosmétiques	A61K, P
Produits agricoles et alimentaires	A01H ; A21D ; A23B, C, D, F, G, J, K, L C12C, F, G, H, J ; C13D, F, J, K

Procédés industriels

Procédés techniques	B01 ; B02C ; B03 ; B04 ; B05B ; B06 ; B07 ; B08 ; F25J ; F26
Manutention - imprimerie	B25J ; B41 ; B65B, C, D, F, G, H ; B66, B67
Appareils agricoles et alimentation	A01B, C, D, F, G, J, K, L, M ; A21B, C ; A22 ; A23N, P ; B02B ; C12L ; C13C, G, H
Travail des matériaux	A41H ; A43D ; A46D ; B28, B29 ; B31 ; C03B ; C08J ; C14 ; D01 ; D02 ; D03, D04B, C, G, H ; D06B, C, G, H, J, L, M, P, Q ; D21
Environnement - pollution	A62D ; B09 ; C02 ; F01N ; F23G, J

Machines - mécanique - transports

Machines-outils	B21 ; B23 ; B24 ; B26D, F ; B27 ; B30
Moteurs - pompes - turbines	F01 (sauf F01N) ; F02 ; F03 ; F04 ; F23R

Procédés thermiques	F22 ; F23B, C, D, H, K, L, M, N, Q ; F24 ; F25B, C ; F27 ; F28
Composants mécaniques	F15 ; F16 ; F17 ; G05G
Transports	B60 ; B61 ; B62 ; B63B, C, H, J ; B64B, C, D, F
Spatial - armement	B63G ; B64G ; C06 ; F41 ; F42

Consommation des ménages - BTP

Consommation des ménages	A24 ; A41B, C, D, F, G ; A42 ; A43B, C ; A44 ; A45 ; A46B ; A47 ; A62B, C ; A63 ; B25B, C, D, F, G, H ; B26B ; B42 ; B43 ; B44 ; B68 ; D04D ; D06F, N ; D07 ; F25D ; G10B, C, D, F, G, H, K
BTP	E01 ; E02 ; E03 ; E04 ; E05 ; E06 ; E21

Annexe 7 - Liste des domaines d'application

Agriculture, sylviculture, pêche
Industries agricoles et alimentaires
Habillage, cuir
Édition, imprimerie, reproduction
Industrie pharmaceutique
Fabrication de savons, de parfums et de produits d'entretien
Industries des équipements du foyer
Industrie automobile
Construction navale
Construction de matériel ferroviaire roulant
Construction aéronautique et spatiale
Autres véhicules
Industries des équipements mécaniques
Fabrication de machines de bureau et de matériel informatique
Industries des équipements électriques et électroniques
Industries extractives
Fabrication de verre et d'articles en verre
Fabrication de produits céramiques et de matériaux de construction
Industrie textile
Travail du bois et fabrication d'articles en bois
Industrie du papier et du carton
Chimie, caoutchouc, plastiques
Métallurgie et transformation des métaux
Fabrication de matériel électrique
Fabrication de composants électroniques
Production de combustibles et de carburants
Production et distribution d'électricité, de gaz et de chaleur
Captage, traitement et distribution d'eau
Bâtiment
Travaux publics
Commerce et réparation automobiles
Commerce de gros, intermédiaires
Commerce de détail, réparations
Services de transports
Activités financières
Activités immobilières
Postes et télécommunications
Services informatiques
Services aux entreprises
Assainissement, voirie et gestion des déchets
Recherche et développement
Hôtels et restaurants
Activités récréatives, culturelles et sportives
Services personnels et domestiques
Éducation
Santé, action sociale
Administration

Annexe 8 – Liste des pôles de compétitivité

Biothérapies (Pays de la Loire)
Photonique (Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Aquatique (Nord-Pas-de-Calais)
Image, multimédia et vie numérique (Île-de-France)
Industries et agroressources (Champagne-Ardenne et Picardie)
Céramique (Limousin, Centre et Midi-Pyrénées)
Filière équine (Basse-Normandie)
Nucléaire de Bourgogne (Bourgogne)
Plasturgie (Rhône-Alpes et Franche-Comté)
Cosmetic Valley (Centre, Île-de-France, Haute-Normandie)
Sea-Nergie (Bretagne)
Innovations thérapeutiques (Alsace)
Images et réseaux (Bretagne)
Agronutrition en milieu tropical (Dom-Tom)
Techtera (Rhône-Alpes)
EMC2 (Pays de la Loire)
Industries du commerce (Nord-Pas-de-Calais)
Mer, sécurité et sûreté (Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Viameca (Auvergne et Rhône-Alpes)
Solutions communicantes sécurisées (Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Enrrdis (Rhône-Alpes)
Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre)
Fruits et légumes (Languedoc-Roussillon et Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Lyon Urban Truck & Bus 2015 (Rhône-Alpes)
Vestapolis (Île-de-France) + Normandy Motor Valley (Basse et Haute-Normandie) = Mov'éo
Fibres naturelles Grand Est (Alsace et Lorraine)
Gestion des risques et vulnérabilités des territoires (Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon)
Lyonbiopôle (Rhône-Alpes)
Cancer-Bio-Santé (Midi-Pyrénées, Limousin)
Innovation dans les céréales (Auvergne)
Viandes et produits carnés (Interrégional)
Génie civil ouest (Pays de la Loire)
Up - Tex (Nord-Pas-de-Calais)
Trimatec (Languedoc-Roussillon)
Sports & Loisirs (Rhône-Alpes)
Elopsys (Limousin et Midi-Pyrénées)
Pin maritime (Aquitaine)
Vitagora (Bourgogne)
Parfums, arômes, senteurs (Provence-Alpes-Côte d'Azur et Rhône-Alpes)
Route des lasers (Aquitaine)
I-Trans (Nord-Pas-de-Calais et Picardie)
Transactions électroniques sécurisées (Basse-Normandie)
System@tic (Île-de-France)
Véhicule du futur (Alsace et Franche-Comté)

Ville et Mobilité (Île-de-France)
Enfant (Pays de la Loire)
Vallée de l'Arve (Rhône-Alpes)
Minalogic (Rhône-Alpes)
Aéronautique et espace (Aquitaine et Midi-Pyrénées)
Logistique Seine Normandie (Haute-Normandie)
Mipi (Lorraine)
Chimie-environnement Lyon (Rhône-Alpes)
Énergies renouvelables-bâtiment (Languedoc-Roussillon)
Mobilité et transports avancés (Poitou-Charentes)
Microtechniques (Franche-Comté)
Q@limed Agropolis (Languedoc-Roussillon)
Auto haut de gamme (Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes)
Loisirs numériques (Rhône-Alpes)
Méditech Santé (Île-de-France)
Matériaux domestique (Nord-Pas-de-Calais)
Végétal spécialisé (Pays de la Loire)
Énergies non génératrices de gaz à effet de serre (Provence-Alpes-Côte d'Azur)
Prod'innov (Aquitaine)
L'aliment de demain (Bretagne)
Nutrition santé longévité (Nord-Pas-de-Calais)
Orpheme (Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon)
Polymers Technologie (Basse-Normandie, Haute-Normandie, Centre et Pays de la Loire)
Ecoindustrie (Poitou-Charente)