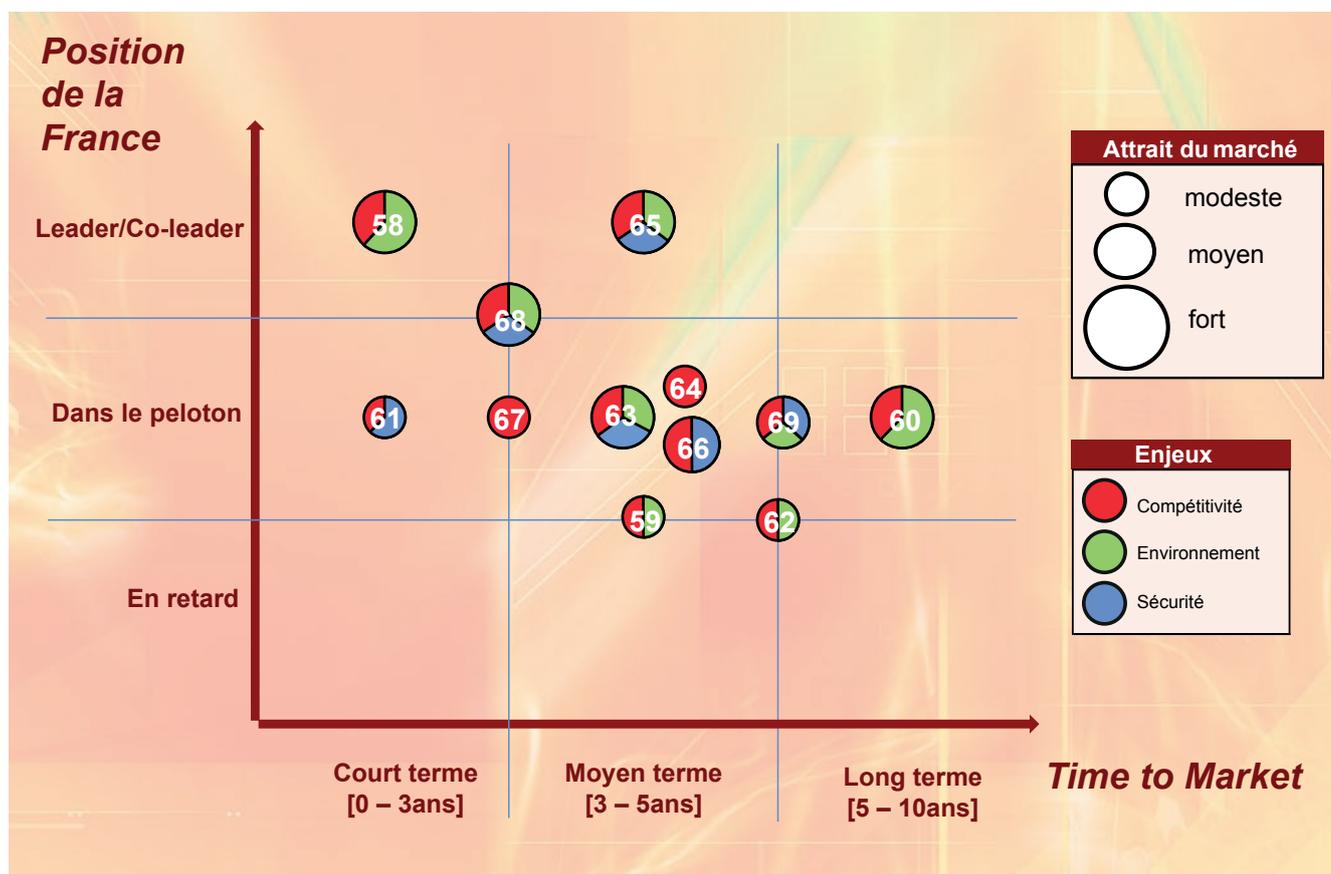


Transports



Transports

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



Contexte et enjeux

Le domaine des transports tels que nous le considérons ici comprend l'ensemble des filières modales, des opérateurs d'infrastructures, ainsi que les filières de la logistique et du transport de passagers.

Les transports en chiffres

Le secteur des transports représente un gisement d'emploi considérable sur l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis la production des sous-ensembles et des véhicules aux services de transport et de logistique, en passant par la conception, la mise en place, la gestion et la maintenance des systèmes et infrastructures de transport.

L'industrie des transports représente 10,6 % de la valeur ajoutée des produits manufacturés en Europe et 8,5 % des emplois industriels. En France, il s'agit du deuxième secteur industriel derrière l'agroalimentaire en chiffre d'affaires, le premier en valeur ajoutée. En 2005, la valeur ajoutée de l'industrie des transports était de 181 Mds€ en Europe (UE27) ; elle représente 17 % des exportations européennes. C'est également un des secteurs qui compte le moins de PME, qui représentaient, en 2005, 20 % des emplois du secteur. [Eurostat].

En 2010, la statistique industrielle estime à 347 000 le nombre d'emplois directs dans l'industrie de construction des matériels de transport en France, pour un chiffre d'affaires de 135,7 Mds€. En 2007, les PME représentaient 34 % des effectifs du secteur. Si la production industrielle dans le domaine est en décroissance en raison de la crise économique depuis 2008, force est de constater que l'indice de production industrielle a décliné dans le secteur de 15 à 20 % depuis 2005. Cette décroissance est principalement causée par le secteur automobile.

Enfin, selon ERRAC [5.28], la demande globale de transport passager en Europe devrait passer de 5 400 Mds km-passagers en 2 000 à 7 500 Mds km-passagers en 2020. Sur le même intervalle de temps, il devrait croître de 70 % pour les marchandises pour s'établir à 6 000 Mds tonnes-km.

Le secteur routier

Le secteur routier présente des enjeux majeurs tant en termes d'activité économique directe que de société et d'aménagement du territoire.

L'industrie de la construction automobile représente en France plus de 737 000 emplois directs et indirects [5.21] et subit depuis 2005 une érosion constante de la production industrielle. Elle génère également près de 700 000 emplois liés à l'usage (garages, assurance, contrôle technique, vente de carburant, auto-écoles...).

Sur le plan industriel, le paysage est marqué en France par la présence de deux constructeurs nationaux, Renault et PSA Peugeot-Citroën, produisant au total près de 5 millions de véhicules par an dans le monde, des équipementiers automobile de rang 1, dont la clientèle est internationale (Valeo, Faurecia, Michelin...), et des implantations françaises de constructeurs et équipementiers

étrangers (Toyota, Continental, Delphi, Robert Bosch, etc.). Dans le domaine des véhicules industriels ou collectifs également, la France possède quelques acteurs comme Renault Trucks (groupe Volvo), Irisbus, Lohr, Manitou... pour une production de véhicules de 60 000 véhicules par an en régime de croisière, seulement 20 000 en 2009, selon le CCF. La production de Renault Trucks est concentrée en France.

Il est à noter que, en dépit de la baisse de la production en France, l'automobile présente un solde commercial nettement excédentaire.

Pour ce qui est du transport proprement dit, on estime le nombre d'emplois dédiés à environ 1 million, soit les entreprises de transport routier (marchandises et passagers), les taxis, la construction et la gestion des infrastructures.

Au total, la filière du transport routier génère environ 2,5 millions d'emplois (20 % des emplois du secteur en Europe) avec un chiffre d'affaires global croissant régulièrement. Le chiffre d'affaires du transport routier en France s'établit à 44 Mds€.

Enfin, le trafic routier est en constante augmentation. Des évaluations de l'Inrets montrent que le trafic routier français, qui était de l'ordre de 500 Mds km en 2005, pourrait atteindre 700 Mds km en 2020.

Le secteur aéronautique et spatial

Le secteur aéronautique français est concentré autour de quelques constructeurs d'avions et d'équipementiers de rang 1. En la matière, la position de la France dans le monde est de première importance, en lien avec ses partenaires européens. La France est le premier pays européen, avec 157 000 emplois directs dans l'industrie, pour un chiffre d'affaires estimé à 36 Mds€ en 2009, dont 80 % à l'export. L'industrie aéronautique pèse ainsi pour 14 Mds€ positifs dans le solde du commerce extérieur. 76 % du chiffre d'affaires concerne les activités civiles. Depuis la chute de production du début des années 2000, les livraisons d'avions par Airbus et Boeing sont en constante augmentation et atteignent aujourd'hui le millier d'appareils par an pour un trafic passager également continuellement croissant : le trafic aérien français est en constante augmentation pour atteindre plus de 150 millions de passagers en 2008. [Eurostat].

Dans le domaine du transport proprement dit, Air France KLM est un des leaders mondiaux du transport de passagers et de fret avec plus de 400 avions exploités, 104 000 employés et un chiffre d'affaires de 21 Mds€ dans le monde.

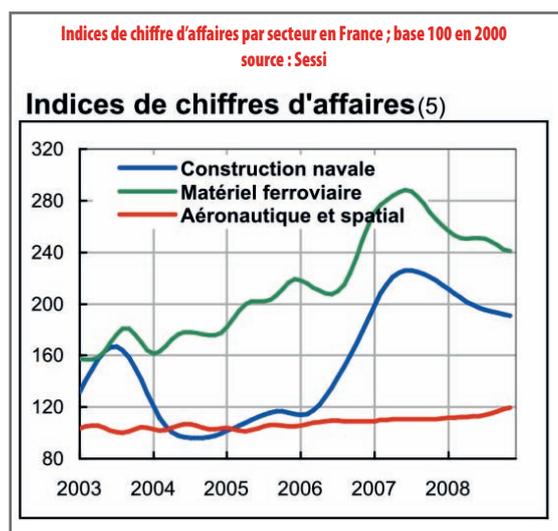
Enfin, le marché mondial des services de maintenance aéronautique était estimé en 2008 à 120 Mds\$ [5.38].



Les acteurs français sont des leaders mondiaux dans l'industrie : EADS (Airbus, Eurocopter, Astrium...), Zodiac, Safran (Snecma, Hispano-Suiza, Messier-Bugatti...), Dassault Aviation, Ariespace, Thales, Onera...
L'industrie spatiale française est également une industrie de pointe au niveau européen, avec des acteurs majeurs comme EADS Astrium, Thales Alenia Space, le CNES ou Ariespace qui à elle seule réalise un chiffre d'affaires de plus de 1 Md€.

Le secteur ferroviaire

La France est le deuxième pays européen pour la construction de matériel ferroviaire derrière l'Allemagne, avec un chiffre d'affaires de 5 Mds€ en 2007 et 15 000 emplois directs [Sessi, Eurostat].
L'industrie ferroviaire a connu la plus forte croissance depuis 2000 parmi les industries du transport.

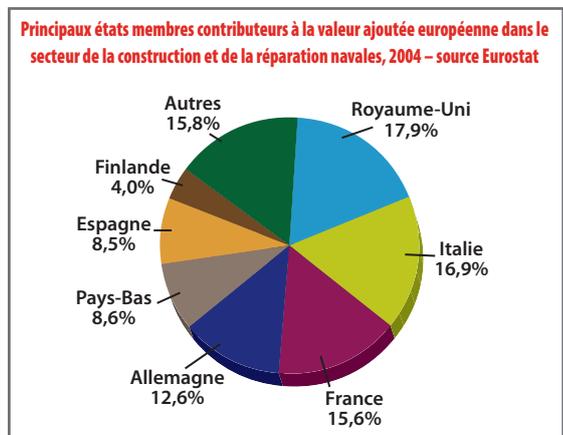


Le paysage industriel français est structuré autour de quelques grands constructeurs français (Alstom) ou étrangers (Bombardier, Siemens transportation), et d'équipementiers (Faiveley, Neotec...).
Les opérateurs de transport français tels la SNCF ou Veolia prennent des positions à l'international sur le fret ou le transport de

passagers. Cette évolution est rendue possible par l'ouverture à la concurrence du fret ferroviaire depuis 2006, et du transport de passagers depuis 2010.

Le secteur naval

L'industrie navale française représente – hors plaisance – un chiffre d'affaires cumulé de l'ordre de 5 Mds€, soit moins de 1% de l'industrie manufacturière française. La France est un des premiers pays de l'Union européenne dans la construction navale, mais reste très loin derrière des pays comme la Norvège et Malte en Europe, ou encore la Corée sur le marché des porte-containers.



En France, les grands chantiers (STX ou DCNS par exemple) possèdent une expertise reconnue sur les bateaux de croisière et les navires pour la défense. L'activité de construction des porte-containers est, elle, largement prise par les chantiers asiatiques. Au-delà de ces grandes catégories, des chantiers plus petits possèdent un savoir-faire reconnu sur les navires spéciaux. L'innovation est vue comme un enjeu stratégique pour maintenir et développer l'activité de ces chantiers alors que la production navale européenne a chuté depuis le début des années 1990 de près de 80% quand la production industrielle de l'UE27 croissait dans le même temps de 35% environ [Eurostat].
Le transport maritime français emploie en France près de 20 000 personnes pour une flotte de 626 navires au 1^{er} janvier 2010, en forte hausse par rapport à début 2009.
L'industrie du nautisme (plaisance) est une des premières dans le monde. La filière en France (y compris loueurs, ports de plaisance...) représente quelque 45 000 salariés dans 5 000 entreprises, pour un chiffre d'affaires de 5 Mds€ [5.32].

Le transport et la logistique

La filière transports et logistique représente une force économique importante en France avec des opérateurs de premier plan, tant dans les opérateurs de plateformes (ADP, Port du Havre, etc.) que des transporteurs (Norbert Dentressangle, Geodis, SNCF Fret...). Les opérateurs de la logistique sont notamment fédérés autour de l'Association française pour la logistique (ASLOG) et du pôle Nov@log.

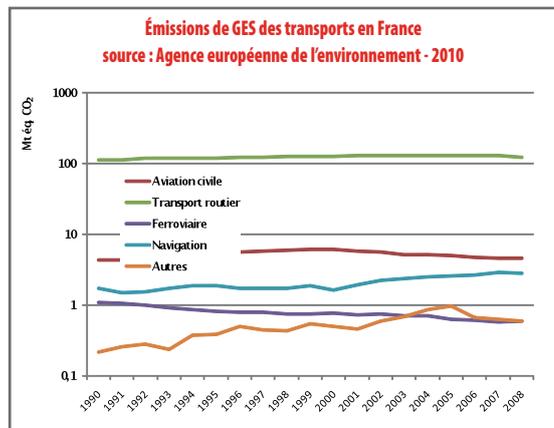
Le transport représente 46 % des emplois de la filière transports et logistique qui totalisait en 2006 1,6 million d'emplois [5.6].

Enjeux transversaux

Les transports se trouvent aujourd'hui au cœur des questions posées à la société sur son appréhension du développement durable, dans toutes ses composantes : environnementale, sociale, économique. La question de la mobilité des personnes et de la gestion durable des transports de marchandise fait ainsi face à de grands enjeux transversaux largement interdépendants.

Des enjeux environnementaux partagés

Sur le plan environnemental, le transport est identifié en France et dans le monde comme l'un des principaux contributeurs à la pollution atmosphérique et aux émissions de gaz à effet de serre, responsables pour l'essentiel de l'élévation globale de température liées aux activités humaines. La contribution du transport aux émissions de gaz à effet de serre n'a cessé de croître. Le seul transport routier est devenu le principal contributeur depuis les années 1990 (cf. monographie « Énergie ») ; si on y ajoute les autres modes de transport, la contribution des transports représente le double de celle du bâtiment ou de l'industrie.



La croissance des émissions pour le transport routier est liée à en grande partie à l'automobile. Cette croissance, bien qu'amorçant un infléchissement, est tirée par la prééminence des véhicules carbonés sur les routes, et par une périurbanisation forte pour laquelle l'offre de mobilité autre est encore peu adaptée. Ainsi, les réponses à ces enjeux seront à rechercher non seulement dans la « décarbonation » et l'électrification des véhicules, mais également dans les choix d'aménagement du territoire et d'urbanisation dans les décennies à venir.

Dans ce contexte, les objectifs que s'est donnés la France en 2003, et réaffirmés régulièrement depuis (Grenelle de l'environnement, 2007), sont de diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050, pour participer à hauteur de son développement industriel à la division mondiale par deux de ces émissions.

Autre enjeu environnemental qui touche l'ensemble des modes (hors naval), la question du bruit est devenu un réel objet d'étu-

des et de préoccupation quant à ses impacts en termes de santé publique. Ainsi, chaque mode est concerné par cette question, tant les cartes de bruit établies dans villes mettent en évidence le lien entre mobilité et bruit, et ceci quel que soit le mode. Outre les questions de confort, 350 000 logements, situés proches de voies de transport, sont exposés à des niveaux élevés de bruit, avec des risques de perturbations induites : ouïe, stress, perturbation du lien social... Pour l'aviation, l'Acare se fixe comme objectif une diminution du bruit des aéronefs de 50 %.

Tant pour les questions de bruit que de pollution, ainsi que pour des raisons de qualité de vie globale, la question de la mobilité – terrestre notamment – renvoie également à celle de l'urbanisme et de l'aménagement des territoires, que nous ne traiterons pas ici. Le développement des voies de communication pose cependant le problème de l'artificialisation des terres, puisque toute emprise d'une voie de communication est faite sur des terres agricoles ou naturelles.

Enfin, l'enjeu environnemental pose la question de la gestion de la fin de vie des équipements et véhicules. La recyclabilité est devenue une contrainte majeure de conception des véhicules, et la filière de déconstruction s'organise autour de chacun des modes pour gérer au mieux les ressources issues de la fin de vie, dans le cadre d'un modèle économique le plus intéressant possible.

Les BRIC, inducteurs de changements

Sur le plan de l'économie des transports, le secteur se voit notamment mis face à deux grands défis industriels, qui ont des conséquences marquées sur la société française. Il s'agit d'une part de la délocalisation pour des raisons de coût de main d'œuvre, de ressources ou de parité de change d'une part, des déplacements des marchés vers les Bric (Brésil, Russie, Inde, Chine) d'autre part :

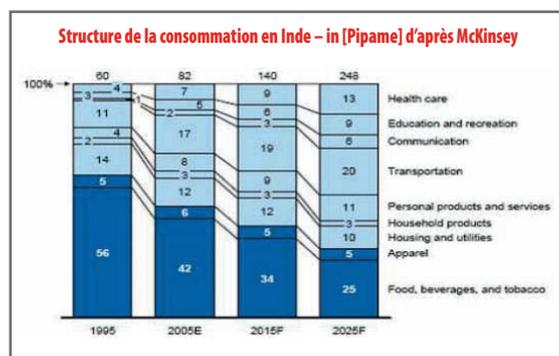
- les coûts de main d'œuvre ont provoqué depuis de nombreuses années et continuent à induire dans l'industrie des transports, en particulier automobile, des délocalisations nombreuses, notamment pour la fabrication des petits véhicules sur lesquels les marges sont les plus faibles. Ces délocalisations, rendues nécessaires pour vendre aux prix du marché, sont cependant lourdes de conséquences en termes d'emplois en France. Outre les emplois directs, les équipementiers de rang 1 et plus sont touchés en cascade. Les PME sont plus sévèrement touchées car elles n'ont pas systématiquement les ressources pour délocaliser elles-mêmes leur production. Il est admis que ce phénomène est irréversible par les seuls mécanismes de l'économie, sans soutien public fort. La conséquence de cet état de fait est que la maîtrise de l'innovation par les groupes industriels et les PME est devenue vitale pour un maintien de l'emploi industriel – principalement qualifié – en France.

- Un phénomène apparu depuis quelques années est la montée en compétence des pays du Bric, alimenté notamment par les transferts de technologies apportés à ces pays comme contreparties à l'accès à des marchés locaux. Les exemples sont nombreux dans tous les domaines : en Chine par exemple, les collaborations entre constructeurs automobiles européens et chinois

permettent aujourd'hui à des sociétés comme BYD de proposer des véhicules complets aux normes européennes, introduisant une concurrence nouvelle à la vente sur les marchés européens, et une concurrence internationale sur la conception des véhicules. Ce phénomène est semblable dans le domaine aéronautique avec la construction d'une usine d'assemblage d'Airbus A320 en Chine. En parallèle, ces pays améliorent leurs systèmes de formation, et font former leurs étudiants en Europe ou aux États-Unis. Aujourd'hui, la concurrence de l'Inde ou de la Chine par exemple se porte aussi sur les centres de recherche ou la conception offshore. Il est donc vital pour l'industrie française de garder un temps d'avance en termes d'innovation, pour garder une part significative de valeur ajoutée en France.

- Les taux de change très favorables aux exportations en dollars poussent les acteurs, de l'aéronautique notamment, à aller vers un rééquilibrage de la production entre les zones euro et dollar. De plus en plus, une partie de la production est donc déportée en zone dollar.

- Enfin, la formidable croissance économique des Brics et autres pays en développement est en train de déplacer les marchés et de bouleverser la position des acteurs. À titre d'illustration, la structure de consommation en Inde fera de plus en plus une large place au transport. Les pays en voie de développement constituent donc aujourd'hui les principaux foyers de croissance pour les industriels du transport et les opérateurs.



Le transport de marchandises et la logistique, secteurs difficilement délocalisables, sont en concurrence, quels que soient les modes de transport.

Qualité de conception

Une réponse aux enjeux de délocalisation réside dans l'enjeu induit que constitue la question de l'efficacité et de la qualité de conception des matériels. La conception d'un véhicule, ou d'un système, ne repose plus aujourd'hui sur un seul acteur, concentré dans un lieu géographique donné. On l'a vu avec les déboires fortement médiatisés de certains industriels : la conception comme la fabrication sont réparties entre plusieurs sites du donneur d'ordre, des bureaux d'études offshore, des sous-traitants. Par ailleurs, on l'a décrit, la diminution des coûts de conception à juste niveau de qualité reste un moyen de lutter contre la délocalisation des prestations à haute valeur ajoutée (recherche, innovation, développement).

Le travail sur les procédures et outils de conception est donc un enjeu pour l'ensemble de l'industrie des transports et des opérateurs des systèmes de transport.

La normalisation

La normalisation constitue un enjeu globalement partagé par l'ensemble des secteurs. Elle est envisagée comme une arme économique par la Chine, les États-Unis ou le Japon. Elle est développée en Europe comme ailleurs et la présence à l'ISO, au CEN ou au CENELEC constitue des atouts stratégiques. La normalisation et la standardisation des technologies et des processus, pour ceux qui la promeuvent, est un moyen essentiel d'imposer ou de favoriser l'adoption d'une technologie et des produits et systèmes qui la mettent en œuvre.

Les congestions

Les congestions routières, particulièrement en milieu urbain et périurbain, représentent un coût pour la société. Si le calcul de ce coût est complexe, des travaux récents [5.22] estiment à 160 M€ le coût social des congestions sur le périphérique parisien. La diminution des congestions représente donc un enjeu important pour les zones périurbaines et urbaines, tant en coût économique qu'environnemental ou sociétal. Un corollaire de cet enjeu réside également dans le développement de l'offre alternative de transport dans ces zones : véhicules légers et propres, développement de nouvelles infrastructures de transport, nouvelles règles d'urbanisme pour concentrer activité économique et habitat.

La congestion est également une source de coût dans le domaine aérien. Sur la base de ce constat, les autorités travaillent à un assouplissement des règles de circulation (ciel ouvert), qui permettra de réduire les coûts de carburant et de diminuer la congestion dans les points critiques de l'espace aérien.

L'accessibilité

L'accès aux moyens de transport et la mobilité en général est l'objet d'une attention particulière dans une société vieillissante. La question de l'âge rejoint alors celle du handicap pour imposer de nouvelles manières de concevoir les transports, qu'il s'agisse des véhicules, des aides à la conduite ou des systèmes dans leur ensemble, pour faciliter leur accès à toutes les populations. Cette question d'accessibilité se pose aussi pour des populations « financièrement défavorisées », qui habitent souvent en périphérie des villes, et qui se trouvent fortement pénalisées dans leur mobilité.

Enjeux spécifiques

La sécurité routière

Malgré une diminution importante de la mortalité routière consécutive à la mise en place des contrôles de vitesse automatiques, la sécurité reste un enjeu sociétal important. En 2009, le nombre de tués sur la route est resté stable (4 273), et le nombre de blessés graves a diminué de 3,1 % à 90 934 [5.23]. Par contre, on constate en 2009 une hausse significative du nom-



bre de conducteurs de deux-roues motorisés tués (+ 9,3 %, ils représentent plus d'un quart des tués), en regard de l'augmentation de leur trafic. Les cyclistes sont aussi plus nombreux à perdre la vie sur la route. La sécurité routière est porteuse d'enjeux spécifiques liés aux nouveaux types de véhicules, électriques notamment.

Cet enjeu de sécurité concerne donc tous les véhicules routiers, dans tous les lieux, et pour tous les types d'usagers (la route est la première cause de mortalité chez les 15-24 ans).

La diminution des coûts d'exploitation

Les domaines ferroviaires et aéronautiques, ainsi que le transport routier de marchandises, voient comme primordiale la diminution des coûts d'exploitation de leurs matériels, sans remettre en cause – voire en améliorant – la qualité de service et la sécurité. La maintenance prédictive et la télémaintenance sont des voies d'amélioration de la disponibilité des matériels, basée sur une surveillance en continu des paramètres de fonctionnement.

Dans le domaine ferroviaire, cette exigence de fiabilité et de durabilité s'applique aussi à l'infrastructure. Des experts estiment aujourd'hui qu'un gain de 30 % de la durabilité des infrastructures participerait à rendre compétitif le fret ferroviaire [donnée groupes TDA 2015].

Limiter les ruptures de charge

Si l'engouement pour le ferroutage a fortement diminué, les ruptures de charges entre modes représentent cependant une perte de temps et d'argent significative. La suppression totale des ruptures de charges serait de nature à réduire le coût total des transports : on parle d'un gain potentiel de plusieurs dixièmes du coût du transport.

La rupture de charge est également un facteur de stress et de retard, et finalement de refus, pour les transports collectifs. Sur un trajet typique en région parisienne, les ruptures de charges des transports en commun (changement de bus, de métro...) représentent une part significative des temps de transport. Cet état de fait est d'autant plus dommageable qu'il touche en priorité les populations les moins aisées, éloignées des centres-ville et des centres de production par des coûts et des conditions d'accès au logement prohibitifs.

Les grandes tendances d'évolution du secteur

La hausse du prix du pétrole

Les évolutions à la hausse du prix du pétrole, et par conséquent des carburants, a montré la capacité de la société à s'adapter à une ressource plus chère. Durant l'année 2009, cette évolution des prix associée à la crise économique a conduit à un recul historique de 1,4 % du trafic autoroutier, particulièrement marqué pour les camions (- 2,8 %).

Cette évolution des cours et la crise économique ont renforcé la volonté des pouvoirs publics de promouvoir la voiture électrique, au même titre que les transports « plus électriques » d'une manière générale, comme un nouveau vecteur de croissance de l'activité industrielle et économique. L'électrification des véhicules, bien amorcée dans le ferroviaire, est donc devenue un enjeu majeur pour tous les acteurs industriels, comme un des moyens de diminuer la consommation de ressources fossiles. À ce titre, l'hybridation est également une voie qui aura un développement important dans les dix ans à venir.

On note que cette tendance conforte par ailleurs la recherche d'une moindre dépendance au pétrole, enjeu stratégique des nations non productrices.

Urbanisation et évolution de la mobilité

Une urbanisation continue à l'échelle mondiale a des impacts forts sur la demande de mobilité : en 2010, le nombre de personnes vivant dans les zones urbaines a dépassé celui des personnes vivant dans les zones rurales, dans le monde. En effet, si elle tire la demande de transports en commun, cette urbanisation se traduit également par un développement fort de la périurbanisation, facteur de développement important de la mobilité individuelle faute d'une offre de transport collectif adaptée à une densité moyenne de l'habitat. Cette périurbanisation est également marquée, notamment en France, par une séparation géographique forte des centres économiques et des lieux de résidence. Une conséquence directe de cette tendance est la forte prééminence des trajets courts : 80 % des trajets font moins de 80 km. Ce constat est mis en avant par les acteurs de la filière automobile pour appuyer les développements du véhicule électrique.

Cette concentration suscite également des travaux et des réflexions autour de l'optimisation de la logistique et des transports de marchandises dans ces zones, et leur articulation avec le transport interurbain.

L'intermodalité et la multimodalité

La promotion de l'intermodalité reste une ambition affichée des différents acteurs, mais peine à émerger en raison des contraintes économiques et d'organisation qu'elle implique. D'un dogme de l'intermodalité au début des années 2000, qui visait à proposer (imposer ?) le mode le plus « durable » ou économique selon les trajets ou parties de trajet, on est passé à une ambi-

tion de multimodalité devant le constat que des organisations intermodales généralisées sont impossibles à mettre en place avec les infrastructures actuelles et que les modes « propres » ne sont pas en mesure de répondre à la demande globale. La multimodalité prend alors comme principe de proposer un choix dans les modes là où cela est possible, dans une démarche d'optimisation de l'ensemble de la filière. Ainsi, le ferroviaire travaille à une meilleure gestion du wagon isolé et diminue le nombre de points de chargement sur le territoire afin de rendre son offre plus compétitive.

Pour le transport de passagers, force est de constater que, malgré la volonté politique de limiter l'usage de la voiture dans les grandes agglomérations, l'offre de transport en commun (en région parisienne par exemple) n'est pas aujourd'hui en mesure de répondre seule, durablement, à un changement des habitudes de mobilité ; cette amélioration devra se situer dans un contexte plus global d'information multimodale qui permettra des déplacements plus fluides (« sans couture » ou *seamless*). L'amélioration de la communication sur les conditions de transport et une réflexion sur le maillage des banlieues sont vitales dans ce cadre pour améliorer l'acceptation du transport collectif.

L'évolution des modèles économiques

Les modèles de vente dans les transports évoluent pour plusieurs raisons : une demande de maîtrise des coûts de maintenance de la part des opérateurs et utilisateurs, le renchérissement des investissements qui rend nécessaire la ventilation du coût de manière différente. Deux exemples peuvent être cités en regard de cette assertion :

- dans l'aéronautique civile et de défense, les utilisateurs des avions utilisent de plus en plus la location avec contrat de maintenance pour disposer de leurs appareils. Ainsi, les loueurs d'avions sont parmi les premiers acheteurs, au profit de tous les types de compagnies, qui ont souvent un parc mixte de possession propre et de location ;
- dans le domaine routier, le renchérissement des véhicules traditionnels d'une part, mais également des véhicules électriques, a provoqué le développement d'offres de location longue, avec maintenance ou extension de garantie, pour maintenir l'attractivité des modèles. L'exemple emblématique en est la proposition de vente de véhicules électriques avec locations des batteries (Renault) ou de location complète du véhicule (Bluecar de Bolloré).

D'une manière générale, l'évolution des *business models* fait passer les consommateurs d'un achat de matériel à un achat de services.

De plus, l'économie de la production est elle aussi en train de changer à travers les choix stratégiques faits par les acteurs des systèmes de transport. Ainsi, dans l'industrie, les constructeurs de véhicules incorporent des métiers qu'ils ne maîtrisaient pas jusqu'ici, afin de garder la mainmise sur des briques à forte valeur ajoutée dans les véhicules. Ainsi, et à titre d'exemple, une partie de la valeur ajoutée qui portait sur le moteur à explosion se

voit reportée sur les moteurs électriques, les systèmes de batteries dans les véhicules électriques et hybrides et le contrôle système. Des constructeurs de véhicules historiques comme Renault et PSA, ou encore de nouveaux entrants (Bolloré, en association avec Pininfarina) s'attachent à maîtriser ces postes clés de la chaîne de valeur des voitures de demain et intègrent les compétences qui y sont liées.

Des temps de transport productifs

Enfin, les différents opérateurs de transport s'attachent de plus en plus à rendre productifs les temps de transport, comme un enjeu commercial pour attirer et garder les clients. En effet, un avantage majeur des modes collectifs est la possibilité donnée aux passagers de disposer de leur temps de transport comme bon leur semble. Qu'il s'agisse de travail ou de divertissement, la généralisation des accès à Internet dans les avions est en cours, son installation dans les trains à l'étude. Quant à l'automobile, la prestation des services de communications de ce type est vue comme un moyen de financer l'installation des dispositifs de communications par une offre tarifée.

Les tendances technologiques et les technologies clés

L'allègement des véhicules

Trois principales voies sont envisagées pour réduire la consommation de carburants des véhicules. La première d'entre elles, sur laquelle portent beaucoup de travaux consiste à alléger le véhicule. Pour cela, le travail est fait sur chaque composant et sous-ensemble du véhicule. Cette tendance technologique concerne tous les modes terrestres et aériens, et doit être considérée sous contrainte de ne pas changer le comportement des véhicules (confort, dynamique, sécurité...).

L'allègement est porteur de verrous technologiques sur tous les types de matériaux :

- Les parties de moteur avec des contraintes de tenue en température,
- Les éléments de garniture et leur recyclabilité,
- L'architecture même des véhicules, qui doit permettre le désassemblage sans dégrader la sécurité...

Voir fiche :

- 68. Matériaux et technologies d'assemblage pour l'allègement.

L'amélioration des moteurs thermiques et des carburants

Si le politique se fait le porte-parole d'une volonté d'investissement massif sur le véhicule électrique, tout le monde s'accorde pour affirmer que les gains en termes de gaz à effet de serre apportés par cette voie seront marginaux à court terme, compte

tenu des prévisions de production et de vente les plus optimistes. Le thermique, dans tous les modes, restera le mode de propulsion majoritaire dans les 20 ans à venir – voire plus. Le transport ferroviaire, très électrifié en France, demeure cependant aujourd'hui encore majoritairement avec des motrices diesel dans le monde : les ventes diesel sont cinq fois plus importantes que celles de motrices électriques au niveau mondial.

Ainsi les travaux sur les améliorations des moteurs thermiques et des turbines restent-ils de première importance pour atteindre les objectifs environnementaux que la France et l'Europe se sont donnés. Il est à noter que les moteurs thermiques se développent également, notamment dans l'automobile, sur de nouveaux types d'architectures hybrides dans lesquelles la propulsion est assurée par des moteurs électriques ; le moteur thermique (*range extender*) sert alors de génératrice pour recharger les batteries. Dans une version moins ambitieuse le moteur thermique est simplement de plus petite taille (*downsizing*) si un surcroît de puissance peut être apporté par des moteurs électriques en cas de besoin.

Voir fiches :

- 58. Moteurs à combustion interne.
- 60. Nouvelles technologies de turbomachines.

L'électrification des véhicules

Enfin, le troisième axe pour le développement de véhicules moins polluants et émettant moins de gaz à effet de serre est l'électrification des fonctions du véhicule. Cette électrification ne touche pas les mêmes organes selon le mode de transport :

- le naval est utilisateur d'architectures hybrides depuis longtemps en associant des fonctions électriques à des génératrices diesel ;
- l'avion plus électrique, voire tout électrique (hors propulsion) est un objectif technologique majeur des constructeurs. La première étape est aujourd'hui le remplacement de commandes de vol hydrauliques par des commandes électriques. À terme, il est prévu de rendre « électriques » l'ensemble des autres fonctions (climatisation, roulage, freinage, etc.), posant des questions importantes d'architecture et de compatibilité électromagnétique. Ces considérations s'appliquent également en partie à l'hélicoptère ;
- les voitures utilisent depuis déjà longtemps l'électronique et l'électricité pour commander des fonctions ou assister ces fonctions (freinage, direction)... La tendance est maintenant à l'électrification de la propulsion à travers plusieurs voies : l'hybridation légère, qui consiste à récupérer de l'énergie au freinage ou à couper le moteur à l'arrêt avec un alternodémarreur ; l'hybridation moyenne qui apporte un surplus de puissance en cumulant des moteurs électrique et thermique ; l'hybridation lourde dans laquelle la propulsion peut être totalement électrique (hybride rechargeable notamment) ; enfin le véhicule complètement électrique. Dans chaque cas, l'architecture et les composants sont spécifiques ;
- les camions et bus : si pour les camions routiers il est impensable aujourd'hui d'imaginer une propulsion électrique complète,



l'hybridation peut venir à travers le *downsizing* des moteurs thermiques et complément de puissance électrique, ou encore par la prise en charge électrique des systèmes de confort et de maintien des marchandises (froid, chauffage de la cabine, etc.). Dans le cas des bus, ces deux dernières années ont vu naître de nombreux projets portant sur une approche nouvelle des transports en commun, avec par exemple la mise en convoi de séries de véhicules électriques indépendants. L'hybridation avec *stop-and-start* est aussi particulièrement adaptée aux profils de mission urbains et déjà des offres commerciales apparaissent ; la recherche se poursuit avec l'hybride rechargeable par bibe-ronnage en station et l'électrification complète du mode bus se profile à terme, assurant un rapprochement avec les technologies propulsives du trolleybus et du tramway ;

- les trains, déjà largement électrifiés, font l'objet de travaux sur l'architecture globale, la répartition de la propulsion, etc. Pour les tramways, de fortes demandes existent pour une amélioration de l'autonomie entre les sections alimentées pour favoriser l'esthétique des centres-villes.

Enfin il est important de noter que cette tendance technologique s'accompagne d'une remise en cause profonde des modèles économiques classiques du secteur, voire du rôle des acteurs de la filière. Notamment, l'installation et la gestion des infrastructures de recharge pour les véhicules routiers posent un certain nombre de questions de modèle de vente, qui font l'objet d'expérimentations aujourd'hui.

Enfin, à plus long terme, l'architecture des véhicules électriques est favorable à une automatisation, partielle dans un premier temps, de la conduite, soit pendant le transport de passager, soit pour une mise en convoi à des fins de regroupement d'une flotte par exemple.

Voir fiches :

- 59. Moteurs électriques.
- 63. Technologies de stockage et de gestion à bord de l'énergie électrique.
- 64. Électronique de puissance.
- 65. Mécatronique.
- 13. Robotique.

Note : Dans le domaine naval, on assiste également à une résurgence de la voile comme complément de traction pour les cargos, comme moyen de réduire les consommations de carburant.

La surveillance en continu et l'échange de données

Pour servir un certain nombre d'enjeux exposés ci-avant, le besoin d'informations sur le fonctionnement des systèmes en temps réel ou quasi réel est de plus en plus important. Ce besoin sert notamment les dispositifs actifs de sécurité (routière, ferroviaire, aérienne, navale), embarqués ou coopératifs ; les opérations de gestion de trafic ; la télémaintenance ou la surveillance en continu (monitoring) à des fins de maintenance prédictive, etc.

Cette surveillance suscite des développements technologiques sur toutes les briques concernées des systèmes :

- les capteurs embarqués sur les véhicules ou sur l'infrastructure, ainsi que le traitement des informations, via la fusion de données, pour fournir au système une information de haut niveau directement traitable ;
- les systèmes de communications : vecteurs physiques, protocoles, adaptés à leur contexte particulier ;
- les bases de données et les modèles économiques pour le stockage, l'exploitation, la mise à disposition des données. Des questions juridiques se posent également, dans le domaine de la protection des données individuelles, du partage des données entre acteurs... ;
- les modes de diffusion des données ;
- la prise en compte des systèmes nomades existants et embarquant déjà capteurs et systèmes de transmission ;
- les systèmes d'exploitation des données pour la gestion de trafic, la maintenance, les services, le télépéage, etc.

Voir fiche :

- 66. Communications et données.

Méthodes et processus

L'évolution des méthodes et outils de conception est porteuse de grands potentiels de changement et d'amélioration aussi bien des coûts de conception que de la fiabilité des systèmes conçus :

- co-conception ou conception collaborative entre plusieurs acteurs ;

- gestion et suivi des contraintes de conceptions et de fonctionnement des systèmes ;
 - validation des architectures *a priori* ;
 - validation et certification numérique, pour limiter les temps de validation physique des systèmes au minimum indispensable.
- À ce titre, la dissémination des méthodes d'optimisation de l'ingénierie apparaît comme un objectif important de nombre d'acteurs de l'accompagnement des filières (pôles de compétitivité, chambres consulaires, associations professionnelles...).

Enfin, plus aucun système n'est mis au point sans prendre en compte le rôle et le comportement de l'humain, qu'il soit opérateur, conducteur ou passager. Cette tendance lourde a des implications à plusieurs niveaux, notamment dans la conception des interfaces (qui fait appel à une compréhension fine des interactions), mais également dans l'interaction avec les objets de l'humain : téléphone mobile, systèmes de données...

Voir fiches :

- 61. Interaction homme-machine, ergonomie.
- 67. Démarches d'optimisation de l'ingénierie et de la production.
- 69. Outils et méthode de conception et de validation.

Optimisation des chaînes de transport

Considérer les chaînes de transport dans leur ensemble est devenu un impératif, pour optimiser tant les transports de marchandises (coût financier) que les transports de personnes (coût social). Ainsi, la chaîne de transport considérée de plus en plus par les différents acteurs de la filière est observée de son point de départ à son point d'arrivée. Un certain nombre de voies technologiques sont objets de développement :

- les systèmes d'optimisation logistiques, qui font appel à des outils mathématiques puissants pour résoudre des problèmes d'optimisation de chargement, de trajet, en fonction de contraintes multiples de coût, de ressources, etc. ;
- les systèmes d'information multimodale pour le transport de passagers...

Voir fiche :

- 67. Démarches d'optimisation de l'ingénierie et de la production.

Analyse de la position de la France

La France possède une industrie et des opérateurs de premier plan dans les différents domaines du transport : véhicules terrestres ou aérien, domaine spatial, navires, logistique. Dans l'ensemble de ces domaines, la France figure dans le peloton de tête au niveau européen, voire mondial. Cependant, on observe selon les secteurs des différences notables de positionnement par rapport aux partenaires européens.

Dans l'industrie des transports, les acteurs français industriels couvrent l'ensemble des champs technologiques adressés dans

ce document, avec toutefois une expertise plus prononcée sur les systèmes et l'intégration que sur la fabrication et la conception de composants.

Pour les activités de service également, la France dispose de leaders mondiaux sur les différents secteurs du transport de passagers (RATP, SNCF, Veolia Transports, Air France-KLM...) comme du fret (SNCF Geodis, Air France-KLM, Chronopost, Norbert Dentressangle...). Certaines des infrastructures de transport les plus importantes en Europe sont françaises : la gare du Nord à Paris pour le transport ferré de voyageurs, le port du Havre, l'aéroport de Paris-Charles de Gaulle...

Le classement des 1 000 entreprises européennes qui investissent le plus en R&D (en valeur absolue) [5.7] permet de mettre en évidence quelques faits saillants. Ils ne prétendent pas à l'exhaustivité des dépenses du secteur, mais mettent en évidence la forte position des entreprises françaises en termes de participation à la R&D privée européenne.

Dans le secteur automobile, si la France fait partie des quelques pays européens à avoir des constructeurs nationaux puissants, la dépense de R&D des principales entreprises reste très inférieure à son équivalent allemand avec 6,0 Mds€ en 2009 contre 21,8 Mds€ en Allemagne.

Sur les véhicules routiers, la position de la France, à travers les activités française du groupe Volvo et des équipementiers spécialisés, est dans le peloton de tête des dépenses privées de R&D. Le groupe Volvo fait formellement de la Suède le premier pays européen en termes de R&D des grands groupes dans le domaine des transports routiers, devant l'Allemagne. Ce positionnement de la Suède est cependant en partie dû à la consolidation des chiffres de Renault Trucks dans ceux du groupe Volvo. Ainsi, la R&D des industriels français des véhicules de transport routier de marchandises et de passagers est estimé par le pôle de compétitivité LUTB à 250 M€ annuels.

Dans l'aéronautique, la France est un des premiers pays en termes d'investissement de ses entreprises dans la R&D avec un investissement de l'ordre de 1,6 Md€, ne comprenant pas l'investissement d'EADS, société immatriculée aux Pays-Bas. Ce dernier pays se voit donc crédité d'une dépense de R&D privée de ses grands groupes de 2,7 Mds€ dans l'aéronautique et le spatial.

Enfin, la France est le deuxième pays européen à investir dans la R&D sur les services de transport et de logistique, derrière l'Allemagne, avec respectivement des investissements de 106 et 156 M€ pour les principaux groupes industriels.

Dans ce paysage français, le rôle des pôles de compétitivité sur les transports apparaît comme structurant, y compris au niveau international. Les pôles concernés au premier chef par la thématique transports (Mov'eo, i-Trans, System@tic-Paris région, Lyon Urban Truck & Bus, Véhicule du futur, Aerospace Valley, Astech, Novalog, Id4car...) regroupent les principaux acteurs industriels et des services, ainsi que les PME innovantes qui sont de plus en plus parties prenantes de leurs actions. En ce qui concerne le positionnement de la France, les pôles mettent en général en place des actions de coopération ou de représentation internationale avec des clusters comparables à l'étranger.

Recommandations

Au regard des enjeux auxquels l'industrie des transports fait face, quelques recommandations générales ressortent de l'analyse et de la consultation des experts.

La première recommandation vise à maintenir la dynamique de la croissance et du maintien de l'activité industrielle à travers le soutien à la recherche et à l'innovation. Les mécanismes existants sont jugés utiles et importants, tant pour le soutien à l'activité que pour l'attractivité de la France ; ces mesures sont des facteurs clés pour l'implantation en France d'industriels étrangers :

- crédit d'impôt recherche, y compris et surtout dans sa dernière configuration ;
- financements Oséo, Fui, ANR, etc. pour les projets de recherche collaborative, le financement des développements, le recrutement de docteurs... L'ouverture des appels à projets à des thématiques plus transversales ou organisationnelles permettrait de plus grandes avancées dans le recueil de données et le développement de technologies « molles ». Il est souligné par les acteurs que ces thématiques ne sont pas portées par les instances de labellisation des pôles de compétitivité ;
- l'innovation à partir des usages constitue une tendance lourde pour une bonne adéquation des innovations aux attentes et aux contraintes du marché (ergonomie, modèle économique, acceptabilité sociale...). Comme cela a été initié depuis 2007 et le 7^e PCRDT européen, le soutien aux expérimentations en vraie grandeur (*Field Operational Test* ou FOT) est un élément important dans les programmes de recherche ;
- enfin, des échelles de temps plus courtes que les projets à trois ans seraient de nature à favoriser des collaborations à finalité très applicative.

Une deuxième recommandation est en lien direct avec un des enjeux génériques : la standardisation ou normalisation. Toute action visant à informer sur la normalisation ou standardisation comme arme économique offensive et stratégique est de nature à renforcer la participation de l'industrie française dans son ensemble à des démarches groupées pour imposer sur les marchés ses choix technologiques. La prise en compte insuffisante de cette dimension par les constructeurs et équipementiers français constitue une faiblesse face à des industries nationales fortement mobilisées (Chine, Japon, États-Unis...).

Pour le soutien à l'activité inventive, la question de la simplification du brevet européen reste un enjeu pour la protection industrielle.

Au niveau de la formation proprement dite, plusieurs remarques peuvent être formulées :

- un manque d'attractivité, bien connu, des métiers techniques ;
- une culture de la production, à renouveler y compris dans les écoles d'ingénieurs. L'accent est fortement mis sur la recherche et l'innovation, alors que la production est aussi une activité clé pour l'industrie ;
- un défaut également de culture technique pratique de la formation des ingénieurs : notamment, la réalisation et la mise en

œuvre effective des travaux de conception restent un point faible de la formation pour une bonne prise en compte des aspects concrets de l'activité. Par exemple, la fabrication d'un composant mécanique permet d'appréhender plus finement des aspects qui sont trop abstraits lors de leur conception numérique. À l'autre extrémité de la chaîne, un défaut de formation sur la conception de fonctions complètes apparaît dans les formations.

Enfin, il est aujourd'hui admis que, selon les filières, les grands groupes industriels ne considèrent pas comme faisant partie de leurs missions de tirer un écosystème de sous-traitants établis ou nouvellement créés vers plus de compétences et vers de nouveaux marchés. Les États généraux de l'industrie ont permis une prise de conscience, accompagnée de chartes de bonnes pratiques pour les achats signés en 2010, dont la mise en œuvre nécessite un suivi vigilant.



58. Moteurs à combustion interne

Description

Malgré une tendance à l'électrification des moteurs et des véhicules, les moteurs à combustion interne alimentés par carburants hydrocarbonés, en l'occurrence les moteurs à pistons, restent clés pour le secteur des transports pour plusieurs raisons : ces technologies bénéficient encore d'un potentiel d'amélioration non négligeable ; elles seront encore utilisées plusieurs décennies pendant la transition probable vers le tout électrique ; et enfin leur amélioration vise à répondre au contexte normatif de plus en plus restrictif par la réduction des consommations et la limitation des émissions.

Les innovations technologiques en cours de développement ou à venir concernent de nombreux organes du moteur, du système d'alimentation jusqu'à la ligne d'échappement.

De nombreux travaux sont menés sur l'amélioration de la combustion dans les cylindres notamment par l'amélioration des systèmes d'injection aujourd'hui modélisés et optimisés par simulation numérique : systèmes hautes pressions, nouvelles géométries d'injecteurs, buses à débit variable pilotées par actuateur piézoélectrique...

Et plus spécifiquement :

- pour les moteurs diesels : le HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*) et le LTC (*Low Temperature Combustion*) ;
- pour les moteurs à essence : la combustion en mélange stratifié et la combustion par auto inflammation (CAI) ; La réduction de la cylindrée et l'éco-suralimentation (ou *downsizing*) sont aussi des axes de travail majeurs des ingénieurs motoristes, ces techniques consistent à diminuer la taille du moteur, et donc la consommation tout en conservant les performances :
- suralimenté par turbo, en utilisant par exemple des turbos électriques à bas régime ;
- cylindrée et taux de compression variables (VCR) tel que le moteur développé par MCE-5 en France ;
- désactivation de cylindre qui consiste à déconnecter purement et simplement un ou plusieurs cylindres à bas régime pour les réactiver lors des besoins de puissance.

Au-delà de ces aspects injection et réduction de cylindrée, plusieurs autres pistes d'amélioration sont explorées :

- optimisation des systèmes mécaniques et réduction des frictions : lubrification avancée, réduction des surfaces de frottement et traitements de surface adaptés ;
- matériaux pour l'amélioration de la gestion thermique, avec par exemple pour objectif la réduction du temps de montée en température ;
- capteurs et actionneurs intégrés issus des progrès de la mécatronique et permettant le pilotage toujours plus

fin du moteur par un calculateur.

Parallèlement à l'optimisation du moteur à proprement parler, des recherches sont effectuées sur la dépollution de la chaîne de traction thermique :

- nouvelles générations de filtres, catalyseurs et reformeurs notamment pour traiter le problème des émissions à froid, technologie SCR (*Selective Catalytic Reduction*) qui utilise une adjonction d'urée pour limiter les rejets de NOx ;
- systèmes de pilotage de la chaîne de dépollution, augmentation du nombre de capteurs, amélioration du procédé de recyclage des gaz d'échappements (EGR basse pression).

La durabilité des systèmes anti-pollution est notamment un enjeu important (problématiques de nettoyage et de régénération des filtres et catalyseurs).

Enfin il est à noter que ces évolutions se font en parallèle de l'avènement de nouveaux carburants : carburants issus de la biomasse ou carburants de synthèse nécessitent des adaptations à différents niveaux : injection, filtres, catalyseurs...

Applications

Le premier marché des moteurs à pistons concerne le transport routier. L'objectif est d'améliorer les motorisations actuelles mais aussi d'accompagner la commercialisation des véhicules hybrides. Les constructeurs automobiles se sont lancés depuis plusieurs années dans une course pour améliorer les performances énergétiques de leurs moteurs.

Les poids lourds dont l'électrification totale à moyen terme est peu probable sont aussi concernés par les progrès des moteurs thermiques.

Le secteur aéronautique n'est pas en reste puisque l'aviation légère et depuis peu l'industrie de l'hélicoptère sont intéressées par ces technologies. Eurocopter travaille aujourd'hui sur des moteurs à pistons fonctionnant au diesel ou au kérosène pour ses hélicoptères légers.

Les secteurs du ferroviaire et du naval utilisent des moteurs diesels pour la production d'électricité dans des systèmes hybrides. Les puissances mises en jeu étant bien supérieures à celles rencontrées dans le domaine des transports terrestres, ces applications constituent des marchés de niche ne répondant pas aux mêmes critères de conception et de limitation d'émissions, et qui sont ainsi moins étudiés.

Enjeux et impacts

Portées par de grands groupes industriels, notamment les constructeurs automobiles, le moteur à combustion interne est une technologie d'avenir. En 2007, les carburants dérivés du pétrole utilisés dans ce type de moteur

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

couvraient 97 % de l'énergie utilisée dans les transports routiers à l'échelle mondiale [5.46].

Des progrès conséquents sont encore possibles concernant l'amélioration de cette technologie selon un double objectif : la diminution des consommations et des rejets de CO₂ à travers l'amélioration du rendement énergétique et la diminution des émissions de polluants, tout en adaptant les moteurs aux carburants à moindre impact CO₂, notamment pour répondre aux normes européennes Euro5 en 2009-2010 et Euro6 en 2013-2015.

L'optimisation des moteurs répond aussi à un enjeu économique lié à l'augmentation du coût du pétrole.

Enfin, un enjeu est présent sur les émissions sonores des véhicules.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Energies Nouvelles ; Complexe de Recherche Interprofessionnel en Aérothermochimie (CORIA) – Université de Rouen, CNRS ; Centre de Recherche, d'Innovation Technique et Technologique en Moteurs et Acoustique Automobile (Critt M2A) ; Laboratoire d'Énergétique Moléculaire et Macroscopique, Combustion (EM2C) – CNRS Ecole Centrale Paris ; Laboratoire de Combustion et Systèmes Réactifs (LCRS) – CNRS ; Centre d'Etude et de Recherche Technologique en Aérothermique et Moteurs (Certam) ; Laboratoire de Combustion et de Détonique (LCD) – Ensm Poitiers, CNRS ; Laboratoire Transport et Environnement – Inrets
- **Pôles de compétitivité** : Mov'eo, LUTB2015, ID4Car, Véhicule du Futur, pôle Céramique
- **Constructeurs, intégrateurs et équipementiers** : Renault, PSA Peugeot-Citroën, Eurocopter, Renault Truck, Faurecia, Valeo, Johnson Controls, Delphi, Bosch France, MCE-5 Development

Position de la France

La France est bien positionnée pour ce qui est des transports terrestres, avec notamment des constructeurs automobiles qui se sont intéressés très tôt aux problématiques d'optimisation des moteurs à combustion interne, et qui disposent aujourd'hui de technologies de moteur au rapport performance/émissions parmi les meilleurs du marché, particulièrement pour ce qui est des motorisations diesel.



Analyse AFOM

Atouts

Force industrielle (constructeurs automobiles français), expertise dans le domaine de l'amélioration de l'efficacité énergétique des motorisations, notamment diesel.

Faiblesses

Concurrence interne pouvant disperser les efforts.

Opportunités

Renouvellement des gammes lié aux nouvelles normes d'émissions, accompagnement du déploiement des véhicules hybride, regain d'intérêt pour les petites motorisations.

Menaces

Relâchement des investissements au profit du véhicule électrique, décroissance du marché envisagée à très long terme.

Recommandations

L'effort de soutien envers les motorisations thermiques doit être maintenu malgré l'étude de modes de propulsion alternatifs. Les outils existants pour le soutien de la filière moteur en France doivent être pérennisés. Par ailleurs, les acteurs gagneraient à travailler ensemble le plus tôt possible pour dégager des synergies.

Enfin et de façon plus concrète, il y a un enjeu intéressant sur le développement de petits moteurs (mono, bi ou tri cylindres) fonctionnant en régime stabilisé pour des applications de prolongateur d'autonomie sur véhicules électriques.

Liens avec d'autres technologies clés

41

56

65

68

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



59. Moteurs électriques

Description

Cette fiche concerne les machines électriques de moyenne et forte puissance dédiées à la motorisation dans le secteur des transports.

Les machines électriques sont des convertisseurs d'énergie électrique en énergie mécanique (moteur) et inversement (générateur). Dans le domaine des transports, les machines électriques sont usuellement appelées moteurs électriques, étant le plus souvent utilisées en configuration moteur.

Trois grandes familles de moteur existent aujourd'hui pour des applications de fortes puissances :

- les moteurs synchrones, après avoir été supplantés par les moteurs asynchrones, reviennent sur le devant de la scène notamment dans le domaine des transports routiers, moteurs synchrones à aimants permanents ou moteurs sans balais (*brushless*) ;
- les moteurs asynchrones, aujourd'hui les plus répandus pour leur meilleur rapport qualité/prix ;
- les moteurs à courant continu peu utilisés aujourd'hui pour la motorisation dans les transports.

Les évolutions portent notamment sur l'utilisation d'aimants permanents (alliages néodyme-fer-bore) et de nouvelles géométries (passage d'un flux radial à un flux axial). Par ailleurs la compacité et l'allègement sont améliorés par l'usage de nouveaux matériaux pour le carter, tout en maintenant la résistance aux contraintes mécaniques et thermiques liées aux hautes vitesses de rotation.

Mais les progrès sont surtout attendus sur l'amélioration de ses capacités d'intégration et sur les éléments annexes qui en sont indissociables :

- intégration et amélioration des fonctions d'électronique de puissance telles que l'onduleur qui permet de piloter les moteurs, mais aussi des fonctions permettant une utilisation en générateur pour recharger la batterie lors des phases de freinage ;
- réducteurs et boîtes de vitesse mécaniques ou électroniques adaptés aux spécificités des moteurs électriques ;
- fonctions de monitoring intégrées (température, vibrations, intensité des courants...) ;
- gestion thermique et amélioration des systèmes de refroidissement par air ou par eau.

De nombreux travaux sont notamment réalisés sur le moteur-roue qui, en plus de réduire l'encombrement, permet de limiter au maximum les pertes induites par les couplages mécaniques (la transmission d'énergie est électrique, avec un excellent rendement).

VÉHICULE ÉLECTRIQUE : LES ORGANES SPÉCIFIQUES
ELECTRIC VEHICLE: CHARACTERISTIC COMPONENTS



Applications

Pour le secteur des transports terrestres, l'optimisation du groupe motopropulseur électrique reste aujourd'hui un enjeu important car conditionnant l'ensemble de l'architecture des véhicules électriques ou hybrides.

Des travaux sont en cours sur les moteurs-roue électriques tel que l'Active Wheel de Michelin. Des véhicules à des stades plus ou moins avancés (voitures et bus) sont déjà équipés par ces solutions.

Pour ces applications, les puissances des moteurs utilisées sont de l'ordre de 20 à 60 kW et devraient augmenter avec l'avènement de batteries plus puissantes.

On pourra aussi citer l'importance de cette technologie pour le développement des alternodémarrateurs qui est un premier pas vers l'hybridation et l'électrification des véhicules en élevant la tension du réseau de bord et en permettant la fonction *stop-and-start* (extinction automatique du moteur thermique lorsque le véhicule est à l'arrêt).

Dans le secteur ferroviaire, le gain en compacité des moteurs a permis la répartition de la propulsion sur plusieurs bogies du train, supprimant la locomotive et optimisant le nombre de voyageurs par surface occupée dans le futur AGV (automotrice grande vitesse).

Des projets de recherche sont en cours pour la motorisation du train d'atterrissage des avions de ligne par l'utilisation de moteurs roue électriques (démonstrateur Trame du Corac, le Conseil pour la recherche aéronautique civile). En plus de limiter la consommation de kérosène au sol, cela permettrait de rendre les avions autonomes pour les phases de « taxiage ». L'aviation légère commence à s'intéresser aux moteurs électriques pour la propulsion.

Enfin, les moteurs électriques de fortes puissances équipent déjà depuis un certain temps le secteur naval. Les grands navires sont en effet propulsés par des systèmes hybrides diesel-électriques. Les moteurs électriques sont de plus en plus intégrés dans des pods, nacelles orienta-

Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

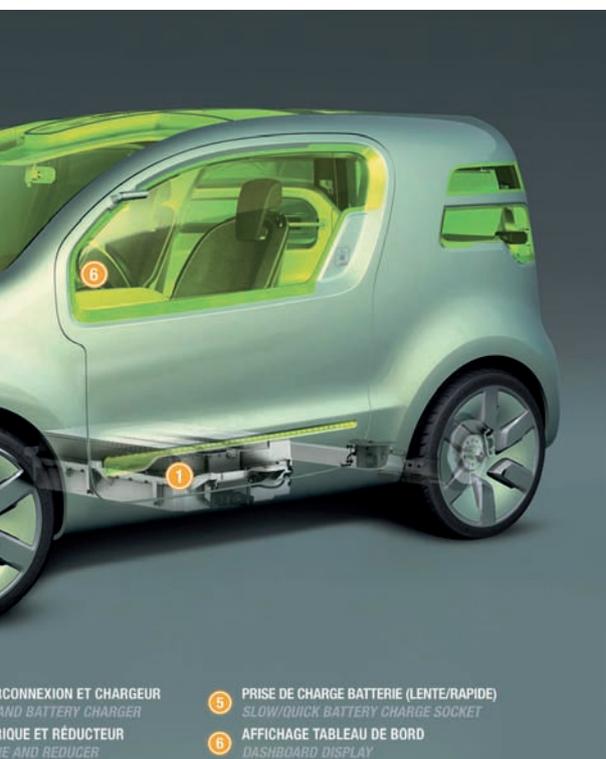
● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation



5 CONNEXION ET CHARGEUR
AND BATTERY CHARGER
6 AFFICHAGE TABLEAU DE BORD
DASHBOARD DISPLAY
1 PRISE DE CHARGE BATTERIE (LENTE/RAPIDE)
SLOW/QUICK BATTERY CHARGE SOCKET

bles dotées d'une ou plusieurs hélices et disposées sous la coque, ces dispositifs assurant à la fois la propulsion et l'orientation du navire.

Les machines électriques sont par ailleurs utilisées dans le domaine de l'énergie et dans l'industrie pour de nombreuses applications.

Enjeux et impacts

Les moteurs électriques sont jugés comme étant un composant d'avenir pour la filière des transports de par les enjeux économiques qu'ils représentent. Ils constituent un composant essentiel de la tendance à l'électrification ; leur intégration est de plus en plus poussée grâce aux progrès de l'électronique de puissance et de la mécatronique.

Le Plan national véhicules électriques annoncé en octobre 2009 prévoit un parc de 2 millions de véhicules hybrides rechargeables ou électriques en 2020, puis 4,5 millions en 2025 en France.

L'avenir du moteur électrique est probablement lié à son intégration au plus près des éléments propulseurs (roues, bogies, pods) pour favoriser le gain de place et assurer des rendements de fonctionnement optimaux.

Acteurs

- **Recherche** : IFP Energies Nouvelles ; Laboratoire de Génie Électrique de Paris (LGEP) – Supélec, CNRS ; Laboratoire d'Électromécanique de l'Université de Technologie de Compiègne (LEC) – UTC ; INRETS Laboratoire des Technologies Nouvelles (LTN).
- **Pôles de compétitivité** : Véhicule du Futur, Mov'eo, Astech, i-Trans
- **Industriels** : Alstom, Michelin, Valeo, EDF, Renault, PSA Peugeot Citroën, Renault Truck, SNCF, Heuliez, Leroy Somer, Messier-Bugatti, Continental, ERNEO, Phoenix International, Bolloré, Lumeneo, Venturi

Position de la France

La France, notamment à travers Alstom, est en bonne position concernant les moteurs électriques de fortes puissances pour des applications lourdes. Ce dernier conçoit notamment des chaînes de traction électriques pour des bus, des tramways ou des trains.

Pour ce qui est des moteurs de puissances moyennes dédiés au secteur automobile, la France compte quelques PME innovantes travaillant sur les véhicules électriques, mais les industriels allemands et japonais sont avancés.

Les constructeurs cherchent aujourd'hui à intégrer la technologie pour conserver la production des éléments clés du groupe motopropulseur électrique.

Analyse AFOM

Atouts

Compétences présentes chez certains grands industriels français (Alstom, EDF) pour les machines de forte puissance.

Faiblesses

Expertise plus limitée pour les puissances moyennes dédiées à la propulsion automobile.

Opportunités

Appropriation de la technologie par les constructeurs pour soutenir le marché des véhicules hybrides et électriques.

Menaces

Technologie de base de conception sommaire pouvant être produite dans les pays à bas coûts. À cela on peut ajouter le risque d'une bataille « d'appropriation » de la technologie dans la chaîne de la valeur qui pourrait disperser les efforts.

Recommandations

Les grands acteurs du domaine devraient être associés pour éviter la dispersion des efforts. Il pourrait à ce titre être intéressant d'étudier l'apport des acteurs des grandes puissances à la filière automobile.

Un soutien de la filière française dans ce domaine passe aussi par un soutien aux quelques PME/PMI françaises travaillant sur les véhicules électriques.

Liens avec d'autres technologies clés

63

64

65

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



60. Nouvelles technologies de turbomachine



complexité, et plusieurs pistes d'amélioration sont étudiées, ces dernières concernent aussi bien le moteur que sa nacelle (son carénage) :

- allégement, particulièrement important pour le secteur aérien, réalisé notamment par l'utilisation de nouveaux matériaux : matériaux composites à matrice organique ou métallique, superalliages (dont l'aluminium de titane), matériaux céramiques. Ces nouveaux matériaux sont étudiés pour résister à des contraintes aussi bien mécaniques que thermiques extrêmes ;
- aérodynamisme : optimisation des écoulements rendue possible par la simulation numérique, nouvelles formes d'aube tirant partie des nouveaux matériaux composites, augmentation du taux de dilution, utilisation de turbines contra-rotatives ;
- optimisation énergétique, réduction de la taille de la chambre de combustion ;
- réduction du bruit notamment à travers l'optimisation de l'aérodynamisme et l'emploi de structures et matériaux spéciaux ;
- expérimentation sur de nouveaux carburants dérivés de biomasse ou de synthèse ;
- résistance et fiabilité, diminution du nombre d'opérations de maintenance.

L'avènement de configurations en soufflante non-carénée (ou « open rotor ») pourrait être envisagé au-delà de 2020. Ces dernières devraient permettre d'améliorer les rendements, mêmes si des verrous subsistent concernant le niveau des émissions sonores et les problèmes de sécurité.

Par ailleurs, les efforts concernant ces systèmes sont accompagnés par l'étude de nouveaux carburants de synthèse et carburants issus de la biomasse. À court terme, ces nouveaux carburants devraient être adjoints à faible dose au kérosène, de façon à limiter les modifications requises sur les turbomachines. À plus longue échéance (dix ans), des réacteurs fonctionnant aux biocarburants sont envisagés. Les projets européens Alfa-Bird, Swafea ou le programme national Calin s'intéressent à ces problématiques.

Applications

Les turbomachines incluent trois familles de moteur, chacune dédiée à un type d'aéronef :

- les turboréacteurs des avions de ligne (Boeing, Airbus) et des avions militaires (Rafale). À titre d'exemple le nouveau moteur Leap X développé conjointement par Snecma et GE sera disponible à partir de 2016 et devrait permettre d'atteindre des consommations de 16 % inférieures à celles des meilleurs turboréacteurs actuels. Le Corac (Conseil pour la recherche en aéronautique civile) a lancé un pro-

Description

Les turbomachines constituent une famille de systèmes de propulsion dédiés au secteur aéronautique. Elles fonctionnent selon le principe d'accélération d'un flux d'air, soit directement utilisé en propulsion, soit récupéré sous forme mécanique pour l'entraînement d'une hélice ou d'un rotor. Cette accélération est obtenue par combustion d'un carburant dans l'air, la détente des gaz ayant lieu dans une turbine qui peut ainsi récupérer l'énergie produite.

Pour les turboréacteurs, la propulsion est assurée d'une part par l'éjection des gaz d'échappement à l'arrière du réacteur, et d'autre part par la soufflante qui agit comme une hélice en entrée du réacteur (réacteur double ou triple flux).

Pour les turbopropulseurs et les turbomachines, l'énergie mécanique produite par la turbine est récupérée pour faire tourner une hélice ou un rotor.

Ainsi les turbomachines sont des dispositifs d'une grande

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

gramme de démonstrateur sur les systèmes propulsifs à fort taux de dilution ;

- les turbopropulseurs utilisés pour l'aviation commerciale régionale (ATR) ou pour l'aviation militaire (A400M) ;
- les turbomoteurs utilisés pour les hélicoptères. Des travaux initiés par Eurocopter et Safran Turbomeca portent notamment sur les turbomoteurs forte puissance (gain de consommation, gains environnementaux, amélioration du rapport puissance/masse).

À noter que les technologies de turbomachines sont très proches des turbines utilisées dans le domaine de l'énergie et certains motoristes ont développés des gammes de turbines dédiées à ce marché.

Enjeux et impacts

Les enjeux concernent essentiellement la réduction des émissions polluantes et des gaz à effet de serre. Ainsi, les objectifs fixés par l'Acare (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) pour 2020 imposent au transport aérien de réduire les émissions de CO₂ de 50 %, de NOx de 80 %. Ces objectifs sont pour beaucoup tributaires de l'amélioration des performances énergétiques des turboréacteurs couplée à l'avènement de nouveaux carburants à faible impact en termes de rejets.

Un des autres enjeux concerne la limitation des nuisances sonores. À nouveau, l'Acare fixe des objectifs ambitieux pour 2020 avec une réduction du bruit perçu de moitié par rapport aux niveaux d'aujourd'hui.

L'enjeu économique est de taille puisque l'industrie des turbomachines et plus généralement l'industrie aéronautique est particulièrement développée en France, 80 % de son chiffre d'affaires est réalisé à l'export. Les vingt prochaines années, ce ne sont pas moins de 30 000 avions de ligne qui devraient être mis en service dans le monde [5.36].

Acteurs

- **Recherche** : Onera ; Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (Isae) ; Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique (LMFA) – Ecole centrale de Lyon ; Complexe de recherche interprofessionnel en aérothermochimie (Coria) – Université de Rouen, CNRS...
- **Pôles de compétitivité et réseaux** : Aerospace Valley, Astech, Gifas, Corac (Conseil pour la recherche en aéronautique civile)
- **Industriels français** : Safran Snecma (notamment à travers la joint venture CFM International créée avec General Electric), Safran Turbomeca, Safran Aircelle, Airbus, Dassault Aviation, Eurocopter

Position de la France

La France dispose d'acteurs majeurs dans le domaine de l'aéronautique, et notamment pour ce qui est des turbomachines à travers Safran et ses différentes filiales. Les activités de Safran en font d'ailleurs le quatrième motoriste mondial, derrière General Electric, Rolls-Royce et Pratt & Whitney. Il est à noter que la collaboration entre Snecma et General Electric est un exemple réussi de coopération industrielle entre la France et les États-Unis. Suite au succès du CFM56 l'alliance CFM International a été reconduite jusqu'en 2040 et s'attache désormais à développer le Leap-X.

Le monde académique et la recherche sont aussi bien développés : l'Onera et les nombreux laboratoires en mécanique des fluides et énergétiques contribuent largement au développement des turbomachines pour l'industrie aéronautique européenne.

Analyse AFOM

Atouts

Safran Snecma est un challengeur sur le marché mondial (moteurs d'avions), Safran Turboméca un leader (moteurs d'hélicoptères).

Faiblesses

Offre peu développée pour les turboréacteurs de faibles puissances, autonomie réduite liée aux coopérations internationales.

Opportunités

Renouvellement des avions vers des gammes plus sobres et respectueuses de l'environnement.

Menaces

Concurrence mondiale sévère, marché de l'aéronautique mondial lié aux taux de change.

Recommandations

La principale recommandation concerne le soutien financier pour le développement des grands programmes de démonstrateurs afin de permettre ainsi aux acteurs français de continuer la course dans le peloton de tête. L'étude des carburants alternatifs doit être renforcée dans le développement de la filière.

Liens avec d'autres technologies clés

41

56

65

68

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



61. Interaction homme-machine, ergonomie

Description

L'interaction homme-machine constitue, sinon une technologie, un savoir et un savoir-faire nécessaires à la mise en œuvre des aides à la conduite dans le domaine automobile, des assistances au pilotage en avionique et dans le domaine naval, du poste de conduite des trains et transports guidés, des systèmes d'aide aux chauffeurs routiers, et enfin à une meilleure supervision des systèmes (salles de contrôle, logistique). La question du rôle de l'humain dans la décision est centrale dans la conception des interfaces, et la compréhension de l'interaction entre opérateur et « machine » est un maillon important de la conception des systèmes, la composante humaine étant alors partie prenante du système. La limitation de la charge sensorielle, du stress des opérateurs est une qualité primordiale dans la conception des systèmes complexes ou critiques.

Ces savoir-faire sont fortement liés à une meilleure connaissance du comportement de l'opérateur sur la base de travaux académiques notamment.

D'un point de vue purement technique, de nouvelles technologies, ou du moins leur diffusion plus large, servent ces ambitions en termes d'interaction. Par exemple :

- interfaces tactiles (écrans, surfaces, etc.) dont l'usage est largement démocratisé par les téléphones mobiles ;
- interaction vidéo par reconnaissance de gestes, analyse de visages, d'attitudes, etc. ;
- interaction vocale ;
- retour d'information haptique, sonore ou visuel ;
- affichage tête haute.

La place des appareils nomades comme interface disponible entre un opérateur ou un usager et le système de transport est ici pleinement posée.

Les questions d'acceptabilité sociale et juridique des interfaces et des fonctions qu'elles sous-tendent sont également posées dans ce cadre. Elles conditionnent directement la capacité d'un produit ou service à remplir sa fonction de manière efficace.

Applications

Non spécifique au transport, cette technologie ou méthodologie est critique pour des domaines aussi différents que le pilotage d'un réseau d'énergie ou de transport (enjeu d'efficacité ou de sécurité) et l'interaction sur ordi- phone (enjeu commercial). De manière non exhaustive, les applications peuvent être :

- aides à la conduite pour les usagers automobiles (particuliers) ou les professionnels (camion, bus, train, tram...) ;
- pilotage non intrusif des systèmes de confort à bord des véhicules (téléphone mobile, navigation, systèmes multimédia...)

- poste de conduite des navires ;
- poste de pilotage des avions ;
- salles de contrôle des systèmes de transport : opérateurs routiers, logisticiens, opérateurs de transports en commun, contrôle aérien ou maritime...

Le marché de l'interaction homme-machine, fondée en grande partie sur le service à mi-chemin entre design et ingénierie, est difficile à chiffrer.

Enjeux et impacts

La question du rôle de l'humain dans la décision est centrale dans la conception des interfaces. Ces connaissances sont diffusantes. Le besoin se fera sentir de plus en plus, tant la qualité de l'interaction est déterminante pour l'acceptabilité d'un dispositif par les utilisateurs. Aujourd'hui, la maîtrise et la compréhension de cette interaction sont considérées comme des facteurs différenciants d'une offre industrielle, voire un prérequis indispensable de la mise au point des systèmes.

En ce sens, il est difficile de circonscrire un marché pour cette technologie tant elle est diffusante. Ses impacts sont par contre immédiatement perceptibles sur la sûreté de fonctionnement des systèmes complexes (les secteurs hautement critiques du nucléaire, de la défense ou de l'aéronautique font figure de précurseurs en la matière).

La sécurité routière, et des transports en général, passe également par ces contraintes.

D'une manière générale, les effets de la bonne conception des interfaces se traduiront dans :

- la productivité sur les systèmes concernés ;
- la consommation énergétique potentiellement (travail sur l'éco-conduite par exemple) ;



Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

- la fiabilité des produits et des *process* ;
- les conditions de travail et leurs conséquences sur la santé des opérateurs...

On se doit de souligner que la bonne définition de l'interaction et des interfaces est un vecteur d'image fort pour l'entreprise.

Acteurs

Deux types d'acteurs se rencontrent sur ces questions, dans un dialogue indispensable pour en maîtriser les tenants et aboutissants. Les industriels intègrent des compétences de conception, d'ergonomie, en interaction avec les laboratoires académiques pour la compréhension des processus (ergonomie, psychologie, sociologie, etc.). Le développement technologique est également pris en compte, au service de l'interaction. Par nature, cette thématique est fortement interdisciplinaire et inter filières.

• **Tous systémiers et équipementiers :** Thales, Areva, EDF, EADS, Airbus, Renault, PSA Peugeot-Citroën, DCNS, Alstom, STX, SNCF, RATP, Renault Trucks, Valeo, Continental...

• **Sociétés spécialisés dans la conception des interfaces et fabricants d'interfaces :**

• **Laboratoires :** Inrets, Lamih, IRCCyN, École nationale supérieure de cognitive de Bordeaux, Université de Strasbourg, Inria

• **Plateformes des pôles de compétitivité :** System@tic, Mov'eo, Nov@log...

Position de la France

La France, à travers son industrie des grands systèmes critiques, occupe une position forte sur cette thématique. Cependant, force est de constater que la diffusion des compétences est aujourd'hui faible dans l'ensemble des filières industrielles.

Analyse AFOM

Atouts

Présence de compétences fortes chez les grands systémiers.

Existence d'un écosystème académique sur la question.

Faiblesses

Faible diffusion de la compétence et de la connaissance.

Opportunités

Prise en compte croissante de la qualité de l'interaction dans l'acte d'achat.

Recommandations

La clé du développement de ces technologies réside dans l'acquisition de connaissances et l'intégration de disciplines telles que la psychologie cognitive, par les industriels. À ce titre, il est recommandé de travailler en profondeur sur les usages à travers la mise en place de laboratoires des usages (*living labs*). Les conditions d'accès à ces laboratoires doivent permettre à l'ensemble des filières de développer des compétences et des connaissances pour une meilleure adaptation de leurs produits et services à l'usage qui en est fait, tant par les consommateurs que dans un milieu professionnel.

Par ailleurs, la diffusion des compétences, ou à tout le moins d'un certain niveau de connaissance, est à organiser au sein des filières ou des regroupements d'entreprises.

Liens avec d'autres technologies clés

17

18

66



Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



62. Optimisation de la chaîne logistique

Description

L'optimisation de la chaîne logistique concerne des technologies logicielles et matérielles, notamment liées aux systèmes d'information et à la communication.

L'objectif est d'optimiser tous les composants de la chaîne logistique, en partant du fournisseur de matière première jusqu'au client final, par une meilleure coordination des différents processus à mettre en œuvre : achats et approvisionnement, production, gestion des stocks, distribution, service client..., qu'ils soient séquentiels, simultanés ou indépendants.

Ces technologies comprennent aussi bien l'optimisation de la charge d'un camion que la réduction des temps morts lors des ruptures de charge :

- systèmes de chargement et outils de manutention tels que les transpalettes et gerbeurs ;
- organisation des entrepôts et automatisation des *process*, dont l'intégration des utilisateurs finaux et les impacts sociaux économiques qui en découlent ;
- architecture des véhicules (barges modulaires, wagons autotractés, véhicules urbains propres et silencieux...);
- outils de traçabilité : marqueurs et capteurs pour la réalisation d'un étiquetage intelligent (RFID, tags...);
- outils d'information en temps réel des professionnels;
- logiciels et méthodes d'optimisation des transports de bien (chargement, tournées, gestion des stocks et des entrepôts, planification, relation clients...): SCM, TMS, SCM, ERP, WMS, éco-comparateurs et éco-calculateurs....
- normalisation : poids et mesures des unités de transport intermodales : conteneurs, caisses mobiles, semi-remorques afin d'optimiser leur remplissage et le transfert modal ;
- éco-conception (conditionnement et emballages) : optimisation des palettes, des emballages et suremballages logistiques et du packaging.

L'optimisation de la chaîne logistique peut être réalisée à différents niveaux :

- niveau stratégique, à long terme (implantation et nombre des entrepôts, choix des fournisseurs, stratégie de production) ;
- niveau tactique, à moyen terme (prévisions, planification de la production, de la distribution et du transport) ;
- et enfin niveau opérationnel, à court terme et en temps réel (production, stockage, distribution et gestion de l'interaction des étapes).

En plus de la modification et de la complexification de la structuration des flux et des processus, certaines tendances vont amener à faire évoluer la gestion de la chaîne logistique :

- le partage des données de référence entre les différents intervenants, à travers des bases de données com-



munes et normalisées (les logiciels en mode SaaS et le *cloud computing* ont un rôle à jouer) ;

- les entrepôts mutualisés fabricants-distributeurs ;
- la distribution mutualisée en zone urbaine : les flux de transport dans les villes sont regroupés pour décongestionner les centres-ville ;
- la logistique ascendante (*bottom-up* ou encore « adaptative ») fondée sur des décisions locales, à la différence de la logistique verticale qui planifie et optimise à l'avance ;
- la prise en compte de la logistique des retours (« reverse logistique ») pour les problèmes de recyclage ;
- la tendance à l'intermodalité ou la multimodalité des différents réseaux de transport.

Applications

Tous marchés de la logistique, quel que soit le secteur (industrie, transport, santé) ou le mode (maritime, fluvial, messagerie, aérien, route...).

Elle comprend notamment :

- le transport de marchandises ;
- les activités d'opérations physiques (manutention) ;
- les activités d'entreposage ;
- et toutes les activités de pilotage et d'organisation opérationnelle de la chaîne logistique.

Enjeux et impacts

L'objectif de l'optimisation de la chaîne logistique est de réduire les coûts tout en améliorant la qualité de service. Pour cela, plusieurs leviers d'optimisation sont disponibles : configuration de la chaîne, coûts de distribution, processus, délais, niveau des stocks...

Face à la mondialisation des marchés, l'enjeu est donc économique et représente une source majeure de gain de productivité pour les entreprises du secteur. Un réseau logistique performant est toujours source de compétitivité. Le développement de l'intermodalité constitue par ailleurs un enjeu important pour le futur de la chaîne logistique. Par exemple, la seule suppression de la rupture de charge pour l'acheminement par rail entre le réseau électrifié et le point de desserte est de nature à faire gagner une part

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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



importante (jusqu'à 50 %) du prix du transport par rail. On pourra également citer l'apparition de préoccupations liées à l'écologie auxquelles peut répondre l'optimisation de la chaîne logistique par une meilleure gestion des ressources. À ce titre, la « green logistique » est actuellement un nouvel axe de travail pour les grands groupes des transports de marchandise qui n'ont plus besoin d'optimiser leur chaîne logistique. Enfin, en termes d'aménagement du territoire, le dynamisme industriel est indissociable de la facilitation des circuits de transport.

Acteurs

- **Recherche** : Laboratoire d'optimisation des systèmes industriels (LOSI) – UTT ; Laboratoire de mathématiques appliquées du Havre (LMAH), Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS) – CNRS
- **Pôles de compétitivité** : Nov@log, I-trans, Advancity, Movéo, LUTB2015
- **Transporteurs** : CFT, SNCF, ECR, Norbert Dentressangle, Géodis, STEF-TFE
Logisticiens, commissionnaires de transport, « intégrateurs » : Norbert Dentressangle, FedEx, Gefco, Géodis, STEF-TFE, Kuehne et Nagel, FM Logistic, DHL Supply
- **Infrastructures** : RFF, VNF, les sociétés concessionnaires d'autoroutes (regroupées dans l'Asfa), les Grands ports maritimes
Manutention : Unim, Paris-Terminal, GMP, Bolloré...
Matériel : Alstom, Renault, Volvo, PSA, Bombardier, Chantiers navals de Haute-Seine, Siemens... et leurs fournisseurs spécialisés (Baudouin, Lohr...)
Infologistique : Soget, Ilog (groupe IBM), Orange, GS1 France...
- **Entrepôts** : Sogaris, Gazeley, Prologis, Parcolog... et les fonds d'investissement : Axa Reim, Lasalle Investment...
- **Chargeurs** : AUTF et réceptionnaires (notamment commerce-distribution)

Position de la France

En plus de nombreux donneurs d'ordre particulièrement expérimentés, onze des quinze plus importants prestataires de la gestion de la chaîne logistique sont situés sur le continent européen, qui est aujourd'hui considéré comme la zone économique la plus mature dans ce domaine.

La France occupe une position de premier plan, et est notamment dotée d'un milieu académique très développé.

Analyse AFOM

Atouts

Communauté académique développée, position géographique de la France privilégiée, nombreux acteurs.

Faiblesses

Malgré sa position géographique, la France n'est pas toujours compétitive pour le passage de flux logistique.

Opportunités

Amélioration de la compétitivité.

Menaces

Fortes contraintes sur les coûts, exigences disparates dans la chaîne de la valeur créant des surcoûts, manque d'implication des activités d'« achats », problèmes concurrentiels pour la diffusion des données.

Recommandations

Plusieurs recommandations peuvent contribuer à l'amélioration de la compétitivité de la filière :

- création d'un référentiel commun pour la mesure de la performance logistique ;
- développer les activités de modélisation et de simulation encore trop limitées et qui permettent pourtant de limiter les coûts ;
- développer l'offre de formation en approche globale des systèmes ;
- étudier et développer des modèles économiques pour développer l'innovation tout en respectant les fortes contraintes de coût ;
- impliquer les services achats qui doivent être intégrés comme chaînon à part entière.

Liens avec d'autres technologies clés

16

21

28

29

66

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



63. Technologies de stockage et de gestion à bord de l'énergie électrique

Définitions

L'exploitation en masse des batteries au lithium dans l'automobile pose d'autres questions – non technologiques – liées notamment au modèle économique de leur mise en circulation, à l'acceptabilité des nouveaux véhicules. Autre point non couvert par la présente description, l'approvisionnement en lithium apparaît aujourd'hui stratégique à certains acteurs, les ressources économiquement exploitables étant fortement concentrées dans le monde, et exploitées principalement par trois entreprises : SQM, Chemetall et FMC Lithium.

Description

Les technologies couvertes concernent le stockage et la gestion de l'énergie électrique dans les véhicules :

- batteries Lithium principalement ;
- systèmes de gestion de batteries (BMS) ;
- supercapacités associées à la batterie ;
- gestion des appels d'énergie au sein du véhicule.

Les travaux de développement visent à :

- assurer et optimiser la gestion du stockage d'énergie et la cyclabilité ;
- diminuer les coûts de production ;
- assurer la sécurité des systèmes ;
- optimiser la recyclabilité, le désassemblage ou la seconde vie des batteries ;
- optimiser la gestion de l'énergie à bord, y compris dans les architectures hybrides.

Les verrous portent ainsi sur des questions liées :

- aux matériaux de la batterie (anode, cathode, électrolyte, packaging et matériaux d'assemblage, contacts électriques) ;
- à l'intelligence de gestion, répartie sur plusieurs étages de la chaîne (batterie, calculateur...).

Applications

Ces technologies répondent à la demande d'électrification des véhicules pour de meilleures performances environnementales. Dans ce contexte, la contrainte de masse est un moteur du développement des batteries lithium, qui présentent des énergies spécifiques très fortes en dépit d'un coût élevé.

La capacité à stocker et délivrer de la puissance électrique en fonction des besoins est centrale dans le développement et l'acceptabilité des véhicules décarbonés. Les secteurs applicatifs comprennent l'automobile et le transport routier, l'avion, le ferroviaire et le naval, pour des applications liées à la propulsion ou aux fonctions auxiliaires.

Son introduction sera progressive, avec 10 % de ventes d'automobiles électriques anticipés en 2020. Selon Pike Research, le marché des batteries Li-ion pour véhicules électriques sera de 8 Mds\$ en 2015.

Enfin, la capacité mondiale de production devrait surpasser fortement la demande en 2015. À horizon de cinq à dix ans, cette tendance devrait conduire à des consolidations autour d'un nombre réduit d'acteurs.

Enjeux et impacts

La technologie améliore l'impact environnemental des transports dans la mesure où l'ensemble du cycle de vie des batteries et du système de gestion est maîtrisé. Compte tenu des mutations induites dans l'industrie

automobile et de l'intensité concurrentielle dans les filières industrielles des transports, sa maîtrise est essentielle pour les acteurs français. Dans l'automobile, cette maîtrise conditionne des choix stratégiques forts.

De plus, c'est la baisse des coûts attendus du développement d'une filière de production de masse qui permettra l'utilisation de la technologie lithium dans d'autres secteurs du transport ou des applications stationnaires.

La technologie est diffusante et d'avenir. Diffusante car sa maîtrise et sa diffusion dans l'industrie sont essentielles pour relever les défis liés à l'électrification des fonctions des véhicules. D'avenir parce que les choix technologiques ne sont pas figés : la maîtrise technique est encore dans les mains des acteurs de la recherche, des grands groupes industriels et de quelques rares PME innovantes.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : LRCS (Amiens) ; ICMCB (Bordeaux), laboratoire Laplace (Toulouse), IMN (Nantes), CEA-Liten, Ines, Ineris, Inrets, EDF, IFP Énergies nouvelles, pôles Mov'eo, LUTB, i-Trans, Tenerrdis, Véhicule du futur...
- **Intégrateurs** : Saft, CEA, Renault, Batscap, Johnson Controls Saft, Dow Kokam France (ex-SEV), E4V, Valeo
- **Utilisateurs** : Renault, PSA, EADS (Airbus, Eurocopter...), DCNS, Cnes, EDF, Alstom Transport, Heuliez, Gruau, Renault Trucks...

Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : en Europe, réseau Alistore ; laboratoire Argonne (États-Unis)...
- **Intégrateurs** : Sanyo, AESC, Lithium energy Japan, Mitsubishi, Nissan, Toyota (Japon), Samsung, Kokam, LG Chemical (Corée), BYD (Chine), Electrovaya (Canada), A123 Systems, Altair Nano, EnerDel, Gs Yuasa, Valence Technology, 3M (États-Unis), Magna Steyr (Autriche), Continental, Deutsche Accumotive, LiTec, BASF, Epcos, Bosch (Allemagne), Leclanché (Suisse)...
- **Utilisateurs** : Daimler, BMW, Volkswagen, EADS, (Allemagne), ESA (Europe), Ford, GM, etc.

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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



Liens avec d'autres technologies clés

51

64

65

Position de la France

La France dispose donc de compétences académiques de premier plan. Industriellement, France et Europe sont des challengers de l'Asie (Japon, Corée et Chine) et de l'Amérique du Nord.

La France et l'Allemagne portent leur industrie nationale, tirée à l'instigation des constructeurs automobiles et des acteurs de la chimie du lithium. La capacité de production française annoncée à horizon 2015 est de 150 000 packs (équivalents véhicule électrique). Toutes les catégories d'acteurs sont représentées dans le paysage français, à l'exception des fournisseurs de matières premières. Bolloré a pris des participations dans des gisements de lithium en Bolivie pour sécuriser ses approvisionnements futurs.

Les Français Batscap, Epcos et Saft (sous contrôle américain) sont les principaux fabricants européens de supercondensateurs.

Analyse AFOM

Atouts

Communauté de la recherche de niveau international sur les matériaux.

Premier fabricant européen (Saft) et acteurs industriels en position challengers.

Acteurs industriels sur l'électronique embarquée et l'intégration dans les véhicules.

Soutien actif et continu des pouvoirs publics.

Faiblesses

Peu de fabricants proprement dits de matériaux en France.

Opportunités

Marchés émergents de l'électrification des véhicules procurant l'occasion aux challengers de prendre des positions sur le marché.

Menaces

Risque sur le rythme d'émergence des marchés de masse.

Diversité des choix technologiques.

Concurrence asiatique et américaine forte. Le Japon avec Sanyo (qui a racheté Panasonic) est le premier.

Recommandations

Les conditions pour le développement de ces technologies ressortent d'une part, de la poursuite des travaux de recherche qui permettront de faire vivre les générations successives de produits, d'autre part, de l'émergence réelle des marchés applicatifs visés, qui seule permettra d'assurer la pérennité de la filière en cours de constitution.

Sur ces sujets, le soutien de l'état à l'industrie est déjà fort à travers l'investissement industriel (FSI), le soutien à l'innovation (plateforme Steeve), le fonds démonstrateur et les commandes massives du plan national véhicule électrique.

L'autre facteur clé de succès qu'il faut maîtriser pour l'industrie française est le chantier de la normalisation, notamment sur la sécurité. Pour arriver à des déploiements effectifs, sécurité et sûreté doivent être traitées en parallèle des développements technologiques. Une analyse stratégique est en cours au C.A.S.

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



64. Électronique de puissance



Description

L'électronique de puissance est une technologie clé dans un environnement qui utilise de plus en plus l'électricité, et ceci pour des usages qui tiennent tant à la production qu'à la conversion et à l'usage de l'électricité.

Il s'agit d'un groupe technologique homogène qui répond aujourd'hui à des enjeux industriels importants. Il peut s'agir de composants (transistors, thyristors...) comme de matériaux (III-V, GaN sur Si...) ou d'architecture, les différents aspects étant interdépendants. À tous les niveaux les verrous technologiques sont liés à la nécessité de pouvoir gérer des moyennes et grandes puissances à des fréquences plus élevées, dans des conditions d'environnement plus rudes, notamment en vue d'une intégration mécatronique.

Ce champ technologique pose des questions de développement liées aux verrous technologiques suivants :

- Les matériaux doivent évoluer pour permettre une

meilleure tenue en température et de moindres pertes. Une conséquence sera la possibilité de monter en fréquence ou encore de faciliter l'intégration dans les systèmes mécatroniques. Les voies de développement concernent les matériaux à grand gap : GaN sur Si, SiC, l'IGBT, diamant.

- Les composants actifs et passifs sont aujourd'hui fabriqués par des acteurs asiatiques. En conséquence, les architectures des systèmes de puissance en Europe sont dépendantes de ces développements, et non l'inverse. Les ruptures technologiques à venir sur les matériaux créeront des opportunités pour modifier les rapports de force et éventuellement renforcer les positions française et européenne sur l'amont de la chaîne de valeur.

- L'architecture est très liée aux deux points précédents et également aux applications potentielles dans les domaines de la mécatronique, de la conversion de puissance, etc.

- La fiabilité des composants est un impératif des systèmes d'électronique de puissance, le taux de défaillance des systèmes devant être compatible avec les contraintes des différentes filières.

- L'intégration et les technologies de production liées à ces différentes ruptures attendues entrent également dans le champ de la technologie. Leur maîtrise est un verrou du positionnement sur le marché de la filière française.

L'électronique de puissance comprend notamment les technologies de transformation et de mise en forme des courants d'alimentation pour la traction et la puissance, ainsi que les technologies de commande électronique sous forte tension et fort courant.

Ces technologies sont communes avec le domaine de l'énergie. Notamment, l'électronique de conversion est un élément clé de tous les modes de génération à base d'énergies renouvelables.

Applications

Transports

- Ferroviaire : l'électronique de puissance est présente dans les dispositifs de traction électrique, de captage de courant, de commande des systèmes de puissance, de génération de courant au freinage...

- Routier : l'électrification du véhicule, est bel et bien amorcée avec la généralisation de l'hybridation et l'émergence des véhicules électriques de nouvelle génération. Les architectures hybrides, les alternodémarreurs, la gestion de l'énergie électrique, la traction, la génération au freinage sont autant de systèmes concernés.

- Aérien : l'avion plus électrique est aujourd'hui une réalité. Les fonctions hydrauliques sont de plus en plus remplacées par des commandes électriques qui requièrent

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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

là encore la gestion de la puissance.

• Naval : l'hybridation de la propulsion dans le domaine naval est un fait établi.

Énergie

La conversion de puissance dans le domaine de la génération d'énergie touche toutes les technologies de production. Dans les applications pour lesquelles se posent des problèmes de conversion comme par exemple le photovoltaïque, ou l'éolien, la gestion de la grille et de la production décentralisée est également un champ d'application.

De manière connexe, l'électronique de puissance intéresse aussi d'autres secteurs, tels que les lasers de puissance, les outils de production, les télécoms, l'éclairage, etc.

Enjeux et impacts

La chaîne de valeur est dominée par les acteurs japonais. Ils maîtrisent les technologies de composants passifs et actifs, et en conséquence imposent en partie les architectures des systèmes qui en découlent. En France, les forces sont dispersées principalement sur les domaines applicatifs.

Les enjeux économiques sont importants : le marché mondial des modules et composants de puissance est de l'ordre de 390 M€ en 2009 et devrait croître à 570 M€ en 2015 d'après Yole ; 65 % de ce chiffre d'affaires est représenté par le seul secteur ferroviaire. Le cabinet Décision précise dans une étude d'avril 2009 que la croissance est attendue à 12 % sur la période 2009-2013.

L'électronique de puissance est enfin une des clés pour répondre aux enjeux environnementaux en lien avec les technologies d'avenir liées.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Laboratoires** : Satie (ENS Cachan), Inrets, Leg, L2ES, Laas, L2EP, IFP Énergies nouvelles
- **Fabricants** : Schneider Electric, Converteam, Thales, Alcatel
- **Intégrateurs** : Areva, Valeo, Alstom, Continental, Airbus, Zodiac, Renault, PSA Peugeot-Citroën, DCNS, EADS, EDF...
- **Organismes** : plate-forme Primes, pôles de compétitivité Mov'éo, Fieec

Principaux acteurs étrangers

- Siemens, ABB, Mitsubishi Electric, Fuji, Hitachi, Toshiba, Infineon, General Electric, Semikron, Bombardier...

Position de la France

La filière française est aujourd'hui dispersée selon les secteurs applicatifs de l'électronique de puissance. Cette dispersion implique un faible poids sur les fournisseurs asiatiques pour la prise en compte des contraintes des industriels dans la conception des composants. Les ruptures technologiques attendues peuvent créer l'opportunité de faire émerger ou croître des acteurs français ou européens sur les composants et leurs technologies de fabrication, adaptés aux usages.

L'étude de Décision indique que la production française en électronique de puissance représente 9% de la production européenne hors transports, pour lesquels la part française est plus importante.

Analyse AFOM

Atouts

Acteurs de premier plan en France sur l'intégration et sur la conception des composants.

Faiblesses

Pas d'acteurs industriels sur la fabrication du composant. Absence d'une filière organisée.

Opportunités

Ruptures technologiques à venir peuvent créer l'occasion de renforcer les positions de la France.

Recommandations

L'absence d'organisation forte en filière de l'électronique de puissance, ventilée sur les secteurs applicatifs, nuit aujourd'hui à la transmission des compétences et de l'expertise. Des transferts seraient à organiser entre les différentes filières pour tableur sur l'expertise de l'une pour le développement et la compétitivité des autres.

Liens avec d'autres technologies clés

59

63

65

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



65. Mécatronique

Description

Initiée par les grands programmes de l'aérospatiale et de l'armement, la mécatronique reprend l'ensemble des procédés de conception et de production pour une intégration plus poussée des fonctions mécaniques, électroniques et logicielles, ainsi que les produits qui en résultent.

La mécatronique nécessite de rassembler des compétences techniques variées (mécanique, hydraulique, pneumatique, électronique, informatique, automatique, métrologie...) mises en commun à travers des démarches de co-ingénierie et de travail collaboratif. La combinaison de ces technologies doit être étudiée dès la phase de conception des systèmes mécatroniques de façon à garantir leur fiabilité : analyse fonctionnelle, simulation du comportement dynamique et évaluation de la sûreté de fonctionnement.

Fondamentalement, un système mécatronique a pour finalité une action physique pilotée par une brique intelligente. Ainsi, les composants suivants entre dans son champ d'applications :

- actionneurs autonomes à faible et à forte puissance ;
- capteurs de différentes natures (pression, température, imagerie...);
- organes de conversion, de stockage et de gestion de l'énergie ;
- composants actifs et passifs ;
- lois de commande et logiciels embarqués ;
- systèmes communicants, dont les technologies sans fil.

L'intégration mécatronique accompagne la tendance à la miniaturisation des systèmes électroniques et électromécaniques avec la réalisation de systèmes toujours plus compacts.

Applications

Tous les marchés des transports sont concernés par la conception, la fabrication et la mise en œuvre des dispositifs mécatroniques. Elle constitue en effet une des bases de l'intelligence embarquée aujourd'hui.

Dans le secteur automobile, la mécatronique accompagne l'augmentation du niveau d'équipement et l'intégration de fonctions de plus en plus complexes : systèmes pour l'aide à la conduite et la sécurité active (freins, roulements et pneus « intelligents »), optimisation énergétique du groupe motopropulseur thermique et/ou électrique (contrôle d'injection, de température, gestion de la charge électrique), systèmes de bord communicants... La mécatronique joue bien évidemment un rôle prépondérant dans la tendance à l'hybridation et à l'électrification des véhicules par l'apport d'un pilotage et d'une

optimisation plus fine des paramètres du ou des moteurs. Pour le secteur aéronautique, la mécatronique intervient dans de nombreux systèmes de l'avion. Elle a un rôle particulièrement important dans la tendance à l'électrification totale des commandes (*fly-by-wire*) opérée sur les avions de conception récente (Airbus A380, A400M, Boeing 787). Dans le domaine ferroviaire, la mécatronique permet de réduire la taille des éléments moteurs et facilite leur intégration, elle est notamment employée par Alstom pour la conception des bogies articulés de la nouvelle automotrice grande vitesse (AGV).

Enfin dans l'industrie navale, la mécatronique intervient dans une moindre mesure pour les systèmes de gestion de l'énergie à bord.

Il est à noter que la mécatronique joue un rôle important dans le domaine de la production (machines-outils, robots...), particulièrement pour l'industrie des transports. On retrouve aussi la mécatronique dans l'électronique grand public, les machines de travaux publics, dans le secteur médical.

Enjeux et impacts

Outre l'enjeu industriel indéniable, la mécatronique permet une réduction des consommations énergétiques par une meilleure intégration des sous-systèmes, et autorise des entreprises du secteur de la mécanique traditionnelle à proposer des produits à plus forte valeur ajoutée à leurs clients à travers cette intégration :

- conception de produits aux performances supérieures aux produits traditionnels ;
- réalisation de nouvelles fonctionnalités ou réduction des coûts ;
- augmentation des performances et de la flexibilité des équipements de production ;
- réduction du nombre de composants critiques.

La mécatronique représente aujourd'hui en France un volume de production global de 4,3 Mds € pour un effec-



Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

tif de 28 200 personnes. 62 % de ce chiffre d'affaires étant réalisé à l'export [5.47].

Deux verrous sont toutefois à noter concernant son développement :

- la multiplicité des métiers et des technologies à maîtriser. La mécatronique impose notamment de faire dialoguer les experts de différents domaines entre eux. Ces difficultés peuvent être surmontées par une mise en réseau efficace des acteurs et par la formation d'ingénieurs et techniciens pluridisciplinaires ;
- les outils et méthodes à disposition des concepteurs de systèmes mécatroniques sont aujourd'hui très divers et trop spécifiques pour apporter un niveau de fiabilité systématique aux phases d'ingénierie. Des projets sont actuellement menés pour développer des outils génériques pour l'ensemble de la filière. On pourra citer le projet O2M (outils de modélisation et de conception mécatronique) de Mov'éo.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : CEA Leti ; Laboratoire électromécanique de Compiègne (LEC) – UTC ; Laboratoire mécatronique 3M (M3M) – UTBM ; laboratoire systèmes et matériaux pour la mécatronique (Symme) – Université de Savoie ; Département mécatronique de l'ENS Cachan
- **Pôles de compétitivité et réseaux** : Thésame, Mov'éo, Arve-Industries, Viameca, Aerospace Valley, Astech, Artema, Cetim, PFA
- **Constructeurs, intégrateurs et équipementiers** : Airbus, Renault, PSA Peugeot Citroën, Valeo, Continental, Johnson Controls, SNR, ST Microelectronics, Michelin, Schneider Electric, Groupe Gorgé, ECA, Cybernetyx, Dassault Systèmes, Zodiac Aerospace



Position de la France

La présence de donneurs d'ordre à vocation mondiale (constructeurs) et les initiatives de mise en réseau par diverses organismes (Thésame, Artema, Cetim, pôles de compétitivité...) ont permis de développer un potentiel d'acteurs important en France, notamment autour de la filière automobile.

Par ailleurs, des initiatives françaises de normalisation des méthodes de conception ont abouti à la publication de deux normes et à la création d'un groupe technique international (Iso) dans le domaine de la mécatronique Iso/TC 184/AH Mechatronics.

Analyse AFOM

Atouts

Communauté structurée ou du moins se structurant, nombre de formations en hausse, initiative de normalisation.

Faiblesses

Frilosité de certains industriels liée aux problématiques de complexité, de fiabilité et de sûreté de fonctionnement.

Opportunités

Amélioration de la compétitivité de la filière transport, nombre d'applications croissant.

Menaces

Maintien d'un cloisonnement entre les différentes disciplines qui pourrait ralentir l'essor de la mécatronique.

Recommandations

La mécatronique est jugée comme étant particulièrement clé pour améliorer la compétitivité de la filière transport en France. Pour cela plusieurs actions doivent être menées :

- développer l'offre de formation, en particulier l'offre de formation continue qui permettrait aux techniciens et ingénieurs d'avoir une vision mécatronique globale ;
- soutenir les projets de recherche appliquée et collaborative sur les trois thèmes prioritaires de la mécatronique : sûreté de fonctionnement, méthodes et outils de conception, micro-machines de production ;
- maintenir l'investissement (le leadership) de la France dans les travaux de normalisation.

Liens avec d'autres technologies clés

13

58

59

64

69

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



66. Communications et données

Définitions

De manière connexe aux communications proprement dites, se posent des questions concernant les données elles-mêmes :

- l'acquisition des données : les capteurs, le traitement, la fusion et la mise en forme des données liées au fonctionnement du sous-système (véhicule et son chargement), du système (trafic, incidents, disponibilité, information multimodale), à la localisation des mobiles, etc. ;
- la gestion des données renvoie à des questions matérielles (bases de données, leur sécurité, leur fiabilité), organisationnelles (interopérabilité des bases, standardisation internationale des formats), juridiques (protection des données personnelles, responsabilité des acteurs), économiques (modèle économique de l'usage et de la gestion des données, déploiement des services et des infrastructures).

Description

Les technologies et protocoles de communication répondent aux enjeux spécifiques des différents modes et de l'intermodalité. Les communications véhicule-véhicule (V-V) et véhicule-infrastructure (V-I) seront de plus en plus sollicitées pour assurer un recueil des données de trafic à destination des opérateurs d'infrastructures, faire coopérer des systèmes pour la sécurité et la gestion du trafic, ou pour assurer les missions de maintenance prédictive ou de services de confort aux utilisateurs des transports.

Dès lors que le transport est de plus en plus géré comme un système intégré, le recueil et l'échange des données entre objets et acteurs deviennent des fonctions essentielles, au même titre que la remontée d'information vers un calculateur de bord est maintenant une réalité incontournable du système « véhicule ».

De fait, l'usage des communications hertziennes se développe à différentes échelles :

- entre véhicule et infrastructure à courte portée pour de l'échange d'information ponctuelle, conjoncturelle ;
- de véhicule à véhicule à moyenne portée pour échanger ou relayer des informations de sécurité ou de trafic ;
- de véhicule à infrastructure à longue portée pour des données liées au fonctionnement du système ou de ses composants, ou encore de l'information de service ou de divertissement à usage des passagers ;
- enfin, de passager à infrastructure pour l'information multimodale en réseau extérieur ou couvert (métro).

Ces technologies s'intéressent principalement aux :

- vecteurs, protocoles, normes de communication en V-V et V-I dans les différents modes, à des fins de gestion, de tarification et de sécurité (bas débit à fortes contraintes de fiabilité) ou de services de « confort » (haut débit à contraintes réduites). L'interfaçage avec les téléphones mobiles est à prendre à considération dans ces axes de travail.
- modèles économiques de déploiement et d'usage de ces vecteurs : si les domaines aérien et ferroviaire ont certaines capacités de mise en œuvre des systèmes innovants en raison des enjeux économiques et de sécurité, le secteur routier doit assoir ces déploiements sur des modèles économiques rentables à court terme. La filière transport et logistique est déjà engagée dans des démarches de standardisation sur les échanges de données.
- contraintes de fonctionnement en fonction des applications : fiabilité, continuité, interopérabilité, prise en compte de la massification, etc.

Dans certains cas, des protocoles spécifiques sont requis pour garantir par exemple la disponibilité des canaux pour l'information d'urgence, la continuité du transfert des don-

nées pour le suivi en continu et la maintenance prédictive des avions ou des trains, l'interopérabilité internationale au regard du standard ferroviaire ERTMS, etc.

Applications

Dès lors que l'on considère le transport selon un angle systémique, les applications des télécommunications sont très variées. On peut cependant les considérer selon deux axes, tous les modes étant concernés.

Les applications critiques

Elles concernent le fonctionnement du système en sécurité. À différents niveaux, les fonctions applicatives sont par exemple la transmission de messages d'urgence ou le *e-call*, les informations de localisation et de fonctionnement des avions et trains, la gestion du trafic, la gestion des flottes, le suivi des conditions de transport des marchandises, les fonctions de tarification ou de contrôle d'accès...

Les applications de services

Ces services représentent une source de revenus potentielle, à même de permettre le financement des systèmes et infrastructures de communication critiques. Ce type d'offre est d'ores et déjà déployé par certaines compagnies aériennes (accès à Internet à bord). Dans l'automobile, la vente de services de confort permettra le financement des équipements de communication liés à la sécurité ou à la maintenance prédictive.

Enfin, les services liés à un enjeu économique dans le secteur de la logistique sont également des champs d'applications majeurs de ces technologies.

Enjeux et impacts

Ces technologies répondent aux enjeux :

- écologique en permettant une meilleure gestion des transports (ciel ouvert pour l'aéronautique, gestion des créneaux ferroviaires, gestion du trafic routier visant une réduction des congestions, optimisation du transport multimodal...);
- de sécurité : transmission d'informations sur les incidents et accidents. Il est notamment envisagé d'imposer à brève échéance la fonction d'*e-call* dans les automobiles neuves, ce qui représenterait un marché européen de 13 millions de véhicules particuliers dans l'UE15 ;
- la qualité de service des systèmes de transport, monomodaux ou multimodaux, favorisant également l'information et la planification. Le développement de ces systèmes permettra aussi le déploiement de média d'information multimodale.

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Industriels** : Orange, SFR, Bouygues Telecom, Sagem, Thales, Renault, PSA Peugeot-Citroën, Alstom, Airbus, Valeo, EADS, Atos origin, Senda, Globalsys, MTS, CTS...
- **Opérateurs d'infrastructures** : Vinci Autoroutes, Sanef, RFF, Aéroports de Paris, RATP, DGAC, Eurocontrol, Nov@log

Position de la France

Les usages imposent que le développement des technologies soit normalisé au niveau européen *a minima*. La France dispose d'acteurs importants pour le déploiement des systèmes de communication dans l'automobile, avec des opérateurs, des constructeurs, etc. Sur le plan des technologies et des déploiements, la France est en léger retard sur l'Allemagne, qui voit ses constructeurs développer et tester activement les technologies de communication dans le cadre des projets européens notamment.

Analyse AFOM

Atouts

Opérateurs importants, constructeurs automobile et équipementiers nationaux.

Faiblesses

Faible coordination des différents acteurs de la chaîne de valeur.

Opportunités

Déploiement de l'*e-call* aux États-Unis et en Europe.
Déploiement de l'ERTMS.
Développement de services multimodaux.
Développement commercial des ordiphones...

Menaces

Risque de développements de protocoles antagonistes.

Recommandations

Le développement et le déploiement des communications dans le secteur automobile se feront sur la base de nouvelles offres de services. Cependant, le renouvellement d'un parc sur une durée typique de douze à quinze ans bride le déploiement des usages. Les industriels établis et les start-up travaillent sur les déploiements et la prise en compte des dispositifs portables dans le système. La généralisation des systèmes de communication impose une approche organisationnelle (conduite du changement) et systémique. Elle doit établir le dialogue entre tous les acteurs de la chaîne pour des déploiements de masse des systèmes, y compris expérimentaux. Enfin, la promotion des standards et normes d'interopérabilité internationaux par opposition aux standards propriétaires est un élément clé pour la compétitivité des entreprises intégratrices et utilisatrices de la chaîne logistique. La participation active des industriels et opérateurs français aux instances de normalisation est stratégique.

Liens avec d'autres technologies clés

14

16

19

61

62

69

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



67. Démarche d'optimisation de l'ingénierie et de la production

Définitions

Kanban : outil de management visuel mis en œuvre par des étiquettes permettant un suivi optimal de la production.

5S : technique de management d'origine japonaise basée sur cinq principes : débarrasser, ranger, nettoyer, ordonner, être rigoureux.

Gemba Walk : technique de management sur le terrain qui consiste à envoyer les responsables de production sur le terrain à la rencontre des opérationnels.

Description

Le concept d'optimisation de l'ingénierie et de la production se réfère aux démarches dites *lean* (littéralement « maigre » ou « svelte »). Ces dernières visent à améliorer l'efficacité des processus d'ingénierie et de fabrication par la recherche des sources de pertes de productivité dans l'ensemble de la chaîne de la valeur.

Développée puis mise en œuvre dès les années trente à travers le système de production Toyota (TPS), les démarches *lean manufacturing* ont permis au constructeur japonais de se hisser au rang des premiers constructeurs automobiles mondiaux.

Ces démarches sont par contre relativement plus récentes lorsqu'il s'agit de leur application à la conception. De façon plus globale, le *lean* peut en effet être appliqué aux processus de R&D complets à travers le *lean engineering*, le *lean design* et le *lean development*.

Structuré autour de plusieurs outils et méthodes (tels que le Kanban, le 5S, le traitement des gaspillages (Muda), le changement d'outil rapide (Smed), le juste-à-temps, les détrompeurs, le management visuel, le Gemba Walk...), le *lean manufacturing* est basé sur l'application de différents principes :

- arrêt immédiat de la production lors de la détection d'un défaut ;
- analyse des problèmes et éliminations des sources d'erreurs, recherche de stabilité ;
- réaménagement optimal des équipements de production pour se concentrer sur les tâches à valeur ajoutée ;
- fluidification des processus et organisation en flux tendus.

Pour ce qui est de son application à l'ingénierie, les démarches *lean* consistent à repousser au plus tard les choix de conception contrairement aux approches classiques (cahier des charges figé dès le départ). Les spécifications et le développement sont focalisés sur les étapes créatrices de valeur. Parallèlement à cela, la priorité est mise sur l'accumulation des retours d'expérience, les outils mis en œuvre sont alors la méthode PDCA (*Plan Do Check Act*), la méthode Lamda (*Look Ask Model Discuss Act*), les courbes de sensibilité (*Trade-off et Limits*), les cartographies de chaîne de valeur ajoutée...

La conception *lean* a deux objectifs : un *time-to-market* le plus court possible et la réduction des coûts globaux de développement par l'élimination du gaspillage de ressource.

Applications

Tous les secteurs industriels sont concernés, *a fortiori* le secteur des transports, pour lequel la démarche *lean* peut être une clé de résistance à la concurrence des pays à bas

coûts. Le *lean* peut être un facteur clé de succès du développement, voire de la relocalisation des entreprises.

Les constructeurs automobiles et les grands équipementiers français ont instauré des démarches *lean manufacturing* depuis le début des années 2000, et tentent aujourd'hui de diffuser ces pratiques auprès de leurs fournisseurs. En témoigne l'initiative de la PFA (Plateforme de la filière automobile) en mars 2010 pour promouvoir le *lean* à travers tous les acteurs de l'industrie automobile française : cette dernière souhaiterait améliorer de 15 % leur efficacité en deux ans en se basant sur la capitalisation et le retour d'expérience des grands industriels.

Le *lean manufacturing* est aussi appliqué depuis un certain temps par les grands acteurs de l'aérospatial (Airbus, Astrium, Safran), du ferroviaire (Alstom) ou du naval (STX). De la même façon que pour le secteur automobile, ces industriels souhaitent aujourd'hui diffuser ces pratiques chez leurs fournisseurs.

Utilisé depuis quelques temps pour le développement logiciel en complément des approches dites « agile », le *lean* pour l'ingénierie est un phénomène plus récent. Il est encore peu développé dans l'industrie française, le secteur de l'aérospatial semble précurseur avec des acteurs tels que EADS, Snecma ou Thalès qui appliquent ces méthodes.

Enjeux et impacts

Ces méthodes constituent une clé pour la compétitivité des entreprises dans les années qui viennent.

Dans un contexte difficile, l'amélioration du gain de productivité, la flexibilité et la réactivité de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement apportées par le *lean manufacturing* constituent un avantage concurrentiel important.

De même, l'amélioration de la rapidité de mise sur le marché par une fiabilisation de la conception par le *lean engineering* constitue aussi un avantage non négligeable.

Le *lean manufacturing*, intégré par les grands groupes, est jugé comme étant une technologie diffusante auprès des PME/PMI.

Le *lean engineering* qui n'en est encore qu'à ses prémices est quant à lui jugé d'avenir.

Ce type de démarche nécessite toutefois de repenser l'organisation de l'entreprise que ce soit pour la production ou pour l'ingénierie et impose des changements parfois lourds. Pour cette raison des réseaux se sont mis en place pour leur promotion et la diffusion de bonnes pratiques.

Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation



Acteurs

Principaux acteurs français

- **Pôles de compétitivités et acteurs du soutien aux PME** : Thésame, PFA, Cetim, Artema, Mov'eo, LUTB2015, Nova@log, les Chambres de Commerce et d'Industrie, le département Performance de l'Ardi Rhône-Alpes, l'Institut Lean France, le Lean Global Network à l'échelle mondiale
- **Acteurs académiques et formation** : Télécom ParisTech, Ecam, Ensam
- **Groupes industriels** : Renault, PSA Peugeot Citroën, Valeo, Airbus, STX, Alstom, Safran, Thalès
- **Acteurs du conseil** : AL Consulting, Chorege, Efidyn, GMI – Goupe Emergence, Ineum Consulting, JMA Consultants, Lean Key, Lean Training, Moventeam, PMGI, Schneider Electric Consulting, Toptech, Vinci Consulting

Position de la France

Le Japon et les États-Unis sont à la pointe de l'application de ce type de démarche.

En France les grands constructeurs et les fournisseurs de rang 1 ont déjà bien intégré ces démarches. La diffusion est aujourd'hui en cours auprès de leur multitude de sous-traitants. Le réseau des acteurs est relativement bien développé avec notamment un centre de gravité en région Rhône-Alpes.

Le *lean engineering* est quant à lui encore peu répandu en France.

Analyse AFOM

Atouts

Acteurs industriels importants déjà bien avancés sur les démarches *lean* et diffusant auprès de leurs sous-traitants.

Écosystème d'acteurs du conseil en *lean* bien implanté. Montée en puissance du réseau, soutien de la PFA.

Faiblesses

Secteur académique tout juste émergent, manque de compétences.

Les acteurs français réalisent parfois une application trop partielle des principes du *lean*.

Opportunités

Réduction des coûts de conception et de production, résistance face aux marchés émergents.

Menaces

Dimension sociale du *lean* liée à une mauvaise image (précipitation et implémentation du *lean* par les outils sans prendre en compte les aspects management, ce qui dévalorise les opérationnels).

Démarche à long terme (il faut entre trois et cinq ans pour qu'une entreprise devienne *lean*).

Recommandations

Le développement et la diffusion du *lean* dans les entreprises ne pourra se faire sans une communication adéquate pour susciter l'adhésion de toutes les parties prenantes. Le *lean* peut être en effet considéré comme une simple technique de réduction des coûts pour beaucoup plutôt que comme un moyen d'améliorer la performance. Une école du *lean* permettrait d'en promouvoir la pratique.

Par ailleurs, il est nécessaire de favoriser la mise en réseau et les actions collectives particulièrement efficaces pour la diffusion de ces méthodes, tels que celles réalisées par la PFA ou par Thésame.

Idéalement, le *lean* devrait être développé de façon à ne plus être « clé » à long terme en France (cinq à dix ans).

Liens avec d'autres technologies clés

13

21

62

69

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



68. Matériaux et technologie d'assemblage pour l'allègement

Définitions

Matériaux composites : assemblage de deux matériaux, un renfort assurant la tenue mécanique (fibres) et une matrice qui peut être organique, métallique ou céramique.

Description

L'allègement des véhicules constitue un enjeu fort pour l'amélioration de l'efficacité énergétique du secteur des transports. Cet allègement peut être réalisé par l'apport de nouveaux matériaux, mais aussi par la mise en œuvre de procédés innovants de fabrication pour la réduction du volume ou de la complexité des assemblages.

Parmi les nouveaux matériaux, on pourra citer :

- les matériaux composites déjà utilisés depuis un certain temps mais qui sont en permanence améliorés notamment par le choix de nouveaux renforts et matrices ou par l'utilisation de nouveaux procédés de fabrication : nouveaux composites thermoplastiques, matériaux thermostructuraux hautes ou moyennes températures, structures composites à matrices organiques ;
- les nouveaux aciers à hautes limites d'élasticité permettant de conserver les performances mécaniques actuelles avec des structures plus légères ;
- les métaux autres que l'acier. Il peut notamment s'agir d'alliages à base d'aluminium, de magnésium ou de titane.

Parallèlement à cela, les procédés d'assemblage sont améliorés pour produire des pièces toujours plus fiables avec moins de ressources : les techniques avancées de soudage (par friction, laser, hybride laser, plasma... en général sans apport de matière), les nouvelles méthodes de tissage et moulage de matériaux composites, les techniques d'assemblages multimatériaux (avec des enjeux sur le comportement de tels assemblages), la fabrication directe de pièces (par frittage, fusion, impression 3D...) ou encore l'usinage grande vitesse.

L'optimisation des pièces tirant parti des nouveaux matériaux et procédés d'assemblage permet des gains de poids parfois considérables qui se répercutent immédiatement sur la consommation du véhicule.

Il est à noter que les outils et méthodes de conception et de validation font aussi partie des technologies clés et sont détaillés dans une fiche dédiée.

Applications

La multiplication des équipements, l'amélioration du niveau de performance des motorisations et la disponibilité d'hydrocarbures bon marché ont contribué à l'augmentation considérable de la masse des véhicules routiers ces dernières décennies. Aujourd'hui les constructeurs et équipementiers cherchent à inverser la tendance. Les réductions se font sur :

- le groupe motopropulseur (moteur, transmission, boîte de vitesse...) : les contraintes sont d'ordre mécaniques et thermiques;
- l'habitacle et la carrosserie : avec des contraintes de résis-

tance aux chocs, à la corrosion, aux rayures, ou encore esthétiques.

À plus long terme (dix ans), la voiture tout composite pourrait être produite en grande série.

Le secteur aéronautique n'est pas en reste, ce dernier ayant bien avant l'automobile cherché à réduire la masse des avions pour réduire les coûts d'exploitation. Les dernières générations d'avion, notamment l'Airbus A350 XWB, le Boeing 787 ou encore le futur Dassault Falcon, font ainsi la part belle aux matériaux composites pour les éléments de structure ou de voilure (53 % de la masse de la structure primaire est en matériaux composites dans l'A350). Le démonstrateur « Avion tout composite » initié dans le cadre du grand emprunt par le Corac (Conseil pour la recherche aéronautique civile) vise à réaliser des gains de près d'une tonne sur les fuselages actuels, ce qui permettrait d'économiser 175 tonnes de kérosène par an et par avion.

Bien que l'allègement soit moins important que dans d'autres secteurs, l'industrie ferroviaire commence à s'y intéresser pour réduire la masse des motrices et des rames. Par exemple Alstom inclut des matériaux composites dans la conception des bogies de sa nouvelle automotrice grande vitesse (AGV).

Enjeux et impacts

Dans tous les cas, les problématiques matériaux répondront à la question « comment faire plus léger en conservant les mêmes performances fonctionnelles par ailleurs ? ». Dans un contexte réglementaire de plus en plus restrictif concernant les émissions, l'allègement constitue un enjeu de taille pour limiter les consommations et améliorer la performance énergétique des véhicules.

Selon une étude récente d'un bureau d'étude [5.24], une diminution du poids des voitures de 21 % est réalisable d'ici à 2017, et de 38 % d'ici à 2020 (hors groupe motopropulseur). La problématique d'allègement est particulièrement importante pour répondre à l'électrification des transports terrestres et contrebalancer le poids des batteries (jusqu'à plusieurs centaines de kilos pour une voiture électrique standard) et des groupes motopropulseurs de plus en plus sophistiqués.

Le secteur aérien est quant à lui particulièrement intéressé par le double enjeu auquel répond l'allègement : diminution du coût d'exploitation des nouveaux avions demandée par les compagnies aériennes, et limitation des émissions de CO₂ (un quart des émissions dans le domaine des transports en France). À noter que dès 2012, le secteur aérien sera intégré au système communautaire européen de quota d'émission, ceci afin de responsabiliser les compagnies aériennes.

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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

Parallèlement à l'enjeu énergétique, les nouveaux matériaux et techniques d'assemblage doivent répondre à d'autres préoccupations :

- la sécurité par un renforcement des structures, des propriétés d'absorption accrue ou encore pour une meilleure résistance à l'environnement (feu, eau, poussière...);
- les problèmes de recyclabilité et de traitement des déchets : en 2015, 95 % des matériaux utilisés dans la fabrication d'une voiture commercialisée en Europe devront être recyclables ;
- les performances acoustiques et la tenue aux vibrations. La réduction de la pollution sonore est notamment un enjeu très fort dans le domaine des transports ;
- l'esthétique pour les matériaux apparents.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : Critt Matériaux ; l'Institut Carnot MIB ; Cetim ; Onera ; Laboratoire des Composites ThermoStructuraux (LCTS) – CNRS, Université de Bordeaux ; Laboratoire d'ingénierie des matériaux de Bretagne (LIMATB), Rescoll
- **Pôles de compétitivité** : EMC2, Mov'eo, ID4Car, Aerospace Valley, LUTB2015, Astech, Pegase, Plastipolis
- **Industriels** : Airbus, Arcelor, Alcan, Aircelle (Safran), Dassault Aviation Faurecia, Plastic Osmium et Inoplast, Renault, PSA Peugeot Citroën, Hexcel Composites, Sora Composites, Timet Savoie, Montupet, ainsi que de nombreux sous-traitants et équipementiers

Position de la France

La France est plutôt bien placée pour ce qui est du travail sur les matériaux et l'allègement pour le secteur des transports. Elle bénéficie en effet de nombreux industriels donneurs d'ordre et de fabricant de matériaux innovants de renommée mondiale. Ces acteurs possèdent des centres d'innovation en France. Le réseau académique est aussi particulièrement développé sur le sujet des nouveaux matériaux et alliages.

Analyse AFOM

Atouts

Potentiel de recherche élevé et nombreux acteurs industriels de premier plan en France.

Faiblesses

Cloisonnement entre les différentes industries.

Opportunités

Secteur des transports très demandeur, marchés en croissance.

Menaces

Prix (rareté) de certains matériaux qui induisent des problèmes de sûreté d'approvisionnements, problèmes liés à la récupération et au recyclage des matériaux composites.

Recommandations

Plusieurs actions permettraient de favoriser le développement des matériaux et technologies d'assemblage pour l'allègement :

- promouvoir le transfert et l'industrialisation par la réalisation de plateformes de validation ou d'actions pilotes ;
- favoriser la diffusion technologique du secteur aéronautique vers le secteur automobile ;
- développer des filières de recyclage adaptées aux nouveaux matériaux.

Liens avec d'autres technologies clés

1

7

11

69

Maturité (échelle TRL)

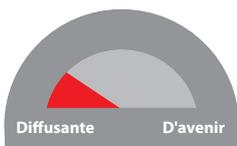
<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input checked="" type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



69. Outils et méthodes de conception et de validation

Description

Les méthodologies et outils de conception des composants et systèmes sont des clés de la compétitivité : ils permettent une conception de plus en plus rapide et de moins en moins chère, sans dégrader les conditions d'application des systèmes ainsi conçus.

Ingénierie système :

- permettre la co-conception des systèmes entre acteurs de différents niveaux dans la chaîne de valeur ;
- faciliter la gestion et la prise en compte des exigences, point clé de l'ingénierie système dans sa phase de conception. Cela implique une traçabilité rigoureuse jusqu'à la validation des systèmes ;
- prendre en compte les différents niveaux d'analyse qui permettent de qualifier un système industriel : Amdec, analyse de la valeur... ;
- intégrer les dimensions d'éco conception (voir fiche dédiée) ;
- dans le logiciel – embarqué notamment – l'outil de conception prend en charge l'encodage dans le référentiel choisi (encodeurs automatiques Simulink-Autosar...) ;
- l'analyse et la prédiction de la fiabilité et de la sûreté de fonctionnement sont des enjeux pour les systèmes complexes pour lesquels elles sont critiques.

Modélisation et simulation :

- la modélisation des systèmes est clé pour le test fonctionnel et la prise en compte des exigences lors de la conception : méthodes formelles, langages descriptifs spécifiques (SysML)... ;
- la simulation s'attache, elle, à évaluer numériquement le comportement physique du système. L'usine numérique, qui vise à simuler le fonctionnement complet de la chaîne de production entre dans cette catégorie. Pour ces deux éléments, on peut véritablement parler de prototypage numérique.

Évaluation et validation :

- la vérification fonctionnelle des systèmes met en œuvre des technologies logicielles et « hardware-in-the-loop » ;
- l'évaluation du cycle de vie, tant du point de vue de ses impacts organisationnels et environnementaux (analyse de cycle de vie) que du point de vue économie (*lifecycle cost planning*) font partie intégrante des processus. Ces outils rencontrent des verrous techniques et économiques :

- adaptation des outils aux usages : les PME ont besoin d'outils spécialisés sur leur métier ;
- le modèle de vente doit être adapté aux besoins et ressources des acteurs. Des modes de vente en SaaS ou en location apparaissent ainsi comme une des voies de diffusion de ces pratiques ;



- l'interopérabilité des outils logiciels doit être garantie aux industriels pour permettre la diffusion de leur usage. Elle concerne les modèles physiques, les exigences et spécifications, etc. ;
- prise en compte des standards de conception et évolutivité : les méthodes de conception doivent être conformes aux standards industriels, et évolutives pour permettre la prise en compte des nouveaux standards.

Applications

Les outils de conception et de validation trouvent leur place à tous les niveaux de la chaîne de valeur de la fabrication des véhicules et de la mise en œuvre des systèmes de transport. Tous les modes ne sont pas aussi avancés dans le déploiement de ces types d'outils vers les équipementiers de rang 2 ou plus.

Le monde aéronautique est précurseur, avec la défense et le nucléaire, sur la mise au point et le déploiement des méthodes et outils d'ingénierie système. Le ferroviaire et le naval suivent. L'automobile a fait sa révolution au niveau des constructeurs, mais le déploiement vers les équipementiers de rang 1, s'il est amorcé, n'est pas complet.

Enjeux et impacts

L'écosystème industriel du domaine des transports fait

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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



face à une concurrence forte des pays à moindre coût de main d'œuvre, non plus seulement sur la production, mais également sur la conception. Dans ce contexte, la maîtrise des aspects haut niveau de la conception à des coûts de développement concurrentiels, en parallèle de délais de conception de plus en plus courts, imposent de concevoir plus vite, de manière plus fiable, de réduire les délais et les coûts de validation en plus de garder la maîtrise française et européenne des technologies majeures. L'enjeu autour de cette question est le maintien de l'emploi en R&D des grands groupes européens, mais également la montée en compétence des PME qui, en développant une offre à plus forte valeur ajoutée, résisteront mieux à leurs concurrents internationaux.

Acteurs

Principaux acteurs français

- Dassault systemes, CEA, Renault, EADS, Airbus, CPC Premium, Areva, Dassault Aviation, Nexter, Thales, RATP, Altran, DCNS, Aneo...
- System@tic Paris-Région, Association Française d'Ingénierie Système (Afis), Incose, Insa Toulouse, INRIA, École Polytechnique, GDR MACS, INPL (Nancy), Ensta, Cnam, Nov@log...

Position de la France

L'ingénierie système pose deux types de problèmes. Le premier concerne le contenu technique et les méthodes. Sur ce plan, la France est dans le peloton de tête des pays développeurs, avec notamment un leader international sur les outils et des acteurs industriels leaders qui développent leurs méthodes.

Le second concerne la diffusion à un écosystème large des pratiques. La position relative de la France en la matière est difficile à estimer, mais il est crucial aujourd'hui de renforcer cette compétence, notamment au sein des PME, avec le juste niveau de complexité adapté aux métiers de l'entreprise.

Analyse AFOM

Atouts

Des acteurs de forte compétence, voire de premier plan international.

Question prise en compte de manière forte dans les projets de pôles de compétitivité impliqués dans les transports.

Quelques PME innovantes.

Faiblesses

Difficultés à diffuser les pratiques par manque d'outils adaptés aux PME.

Faiblesse de l'offre de formation ou de compétences.

Opportunités

Développement de la co-conception.

Menaces

Perte de marché des entreprises au profit des pays émergents.

Recommandations

La diffusion de ces pratiques et de ces outils se heurte aujourd'hui à un obstacle patent qui est le manque de personnels et étudiants formés. Une étude commanditée par le pôle System@tic en 2008 estimait à 12 000 le nombre de spécialistes « systèmes » à recruter dans l'industrie à un horizon de cinq ans, avec un déficit avéré de profils en réponse à la demande industrielle. Le besoin en formation, la plus appliquée possible, est aujourd'hui posé.

La promotion de formats de données normalisés faciliterait l'interopérabilité des systèmes. La généralisation de l'utilisation des outils logiciels à l'usage, peu diffusée aujourd'hui, assortie d'un accompagnement en compétences, est un facteur favorisant de la diffusion de leur utilisation dans l'ensemble de l'écosystème.

Liens avec d'autres technologies clés

19	26	40
58	59	61
62	65	67

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



BIBLIOGRAPHIE

- [5.1] Présentation de la Commission européenne : *Comment expliquer ce qu'est la technologie*, 2005. ftp.cordis.europa.eu
 - [5.2] International Transport Forum : *Key Transport Statistics 2008*, OCDE, 2008, <http://www.internationaltransportforum.org/>
 - [5.3] *Un avenir durable pour les transports*, Commission Européenne, juin 2009
 - [5.4] *Programme de travail 2008-2012* du Predit 4, Predit, 2009
 - [5.5] *Synthèse sectorielle Transports*, Oséo, Avril 2010
 - [5.6] *Chiffres clés du transport*, Édition 2010, MEEDDM, Collection Repères
 - [5.7] *2009 EU Industrial R&D Investment Scoreboard*, Commission européenne, Joint Research Center, Novembre 2009
 - [5.8] Étude « Filières vertes », MEEDDM, Octobre 2009
 - [5.9] *European business: facts and figures*, 2009 edition, Eurostat, 2009
 - [5.10] *Transport outlook 2009 : Globalisation, Transport and Crisis*, OCDE/International Transport Forum Joint Transport research Centre, Discussion paper N° 2009-12, Mai 2009
- Transport routier**
- [5.11] *Stratégie de déploiement des infrastructures de recharge en France*, Dossier de presse de Luc Chatel, 17 février 2009
 - [5.12] *Ertrac Road transport scenario 2030+*, « Road to implementation », Ertrac, 2009
 - [5.13] *Accelerating toward 2020 – An automotive industry transformed*, Deloitte, Septembre 2009
 - [5.14] Eucar : *The Automotive Industry Focus on future R&D Challenges* ; novembre 2009
 - [5.15] Eucar : *The Electrification of the Vehicle and the Urban Transport System* ; juillet 2009
 - [5.16] US Department of Energy : *R&D Opportunities for Heavy Truck* ; juin 2009
 - [5.17] *Livre blanc pour le PREDIT 4, GO2 : Qualité et sécurité des systèmes de transport*
 - [5.18] LUTB 2015 : cartographie des projets de recherche
 - [5.19] *Mutations économiques dans le domaine automobile*, Pipame, avril 2010
 - [5.20] *Rapport de synthèse Motorisation propre*, Plateforme filière automobile, 2010
 - [5.21] *10 % des emplois dans l'automobile : un chiffre trompeur*, Sylvain Barde, Clair & Net, OFCE, février 2009
 - [5.22] *La congestion du boulevard périphérique parisien : estimation, évolution 2000-2007, discussions*, Martin Konning, Centre d'économie de la Sorbonne (Matisse), Janvier 2009
 - [5.23] *L'accidentalité routière en France : une année 2009 de contraste et un début 2010 encourageant*, MEEDDM, 2010
- [5.24] Lotus Engineering - *An Assessment of Mass Reduction, Opportunities for a 2017 – 2020 Model Year Vehicle Program*, mars 2010
 - [5.25] *Feuille de route véhicules routiers à faibles émissions des GES*, Ademe, Juin 2009
- Transport ferroviaire**
- [5.26] Fédération des industries ferroviaires : Brochure, www.fif.asso.fr
 - [5.27] *First annual draft of the ERRAC roadmaps*, Errac, Septembre 2010
 - [5.28] *Strategic rail research agenda 2020*, Errac, 2007
- Transport maritime et fluvial**
- [5.29] *WaterBorne - Vision 2020* ; 2006
 - [5.30] *WaterBorne - Strategic Research Agenda* ; 2006
 - [5.31] *Grenelle de la mer, groupe Navire du futur*, rapport d'étape janvier 2010
 - [5.32] *Les chiffres clés du Nautisme 2007-2008*, Fédération des industries du nautisme
- Aéronautique et espace**
- [5.33] Acare : *Addendum to the Strategic Research Agenda* ; 2008
 - [5.34] Acare : *European Aeronautics - A Vision for 2020* ; janvier 2001
 - [5.35] Pipame-DGCIS *Étude de la chaîne de valeur dans l'industrie aéronautique* ; septembre 2009
 - [5.36] Gifas : *Présentation de l'industrie française aéronautique, spatiale, d'électronique de défense et de sécurité* ; février 2010
 - [5.37] *Bilan annuel 2009* du Gifas, Jean-Paul Herteman, président
 - [5.38] *Aerostrategy 2009 : The attractiveness of the aeronautics MRO market and its segmentation*
 - [5.39] Corac – *Grand emprunt, programme de démonstrateurs*, mai 2010
- Industries support**
- [5.40] IFP : *Quelles énergies dans les transports de demain ?* novembre 2006
 - [5.41] World Energy Council : *Transport Technologies and Policy Scenarios to 2050* ; 2007
 - [5.42] Global Commerce Initiative / Capgemini : *Future Supply Chain 2016* ; mai 2008
 - [5.43] PWC : *Transportation & Logistics 2030* ; octobre 2009
 - [5.44] MEEDDM DRAST : *Prospective Fret 2030* ; juillet 2008
 - [5.45] Pipame-DGCIS-DGITM *Logistique et distribution urbaine* ; novembre 2009
 - [5.46] IFP : *Les énergies pour le transport : avantages et inconvénients*, décembre 2008
 - [5.47] Artema - *Rapport annuel 2009*