



## 52. Réseaux électriques intelligents

### Description

Un réseau électrique intelligent est défini par la Commission européenne comme un système électrique capable d'intégrer de manière intelligente les actions des différents utilisateurs, consommateurs et/ou producteurs afin de maintenir une fourniture d'électricité efficace, durable, économique et sécurisée. Les technologies associées s'articulent autour de :

- un réseau de transport et de distribution d'électricité intelligent équipé notamment de systèmes de transmission et de distribution (sous-stations, réseaux de capteurs) - permettant de communiquer entre les parties prenantes du système (producteurs-distributeurs-consommateurs) - ainsi que l'ensemble des systèmes de contrôle afin d'optimiser la gestion de la distribution, d'ajuster la production et de prévenir les dysfonctionnements du réseau ;
- des compteurs électriques intelligents installés chez les consommateurs et capables d'échanger avec le réseau en temps réel afin de mieux maîtriser la demande, de lisser les pics de consommation et d'effectuer un relevage à distance ;
- des systèmes de production et de stockage de l'énergie en partie décentralisés et permettant des flux bidirectionnels de l'électricité au travers de notamment la mise en place d'un réseau de stations de rechargement de véhicules électriques permettant également d'utiliser les batteries des véhicules comme source d'énergie d'appoint en cas de besoin.

Si une partie des technologies sont déjà proposées par les équipementiers du secteur (nouveaux compteurs, systèmes de contrôle dans les postes de distribution et de transport...), les stratégies de déploiement des systèmes ainsi que les modèles économiques sont en cours de définition. Les compteurs intelligents et les réseaux intelligents font notamment l'objet d'expérimentations visant leur déploiement prochain. Les paramètres clés qui joueront un rôle déterminant sur la forme et la nature des réseaux sont le niveau d'intelligence du système, le degré et la forme de décentralisation et les choix de régulation. Les principaux verrous technologiques portent sur :

- les technologies de réseau sous l'angle des matériels et des systèmes électrotechniques, dont l'électronique de puissance de type FACTS (« Flexible AC Transmission Systems »), qui doivent être adaptées pour s'adapter aux évolutions de l'architecture des réseaux et l'insertion des sources de production décentralisées. Ces systèmes sont une brique de base dans les réseaux électriques intelligents ;

- les systèmes d'information appliqués au réseau suite à la croissance de l'intelligence des réseaux et le développement des produits et services liés à cette intelligence ;
- les technologies de stockage centralisé et décentralisé ;
- la sécurité des réseaux et systèmes électriques intelligents.

### Applications

Cette technologie s'applique au transport et à la distribution d'électricité.

De nombreux programmes sont planifiés, notamment aux États-Unis pour la rénovation du réseau électrique, en Europe dans le cadre du paquet énergie-climat, en Chine, en Russie et en Inde. Le marché potentiel s'élèverait à 65 milliards de dollars en 2013 aux États-Unis, pour environ 42 milliards en 2008 [source : Lux Research].

Les compteurs intelligents sont un segment en fort développement du marché. En France, le remplacement des 35 millions de compteurs électriques à l'horizon 2017 par des compteurs intelligents représente un investissement de 4 Md€. Le marché mondial annuel serait de 4,7 Md\$ en 2013.

### Enjeux et impacts

Le développement des réseaux électriques intelligents est considéré comme prioritaire par de nombreux pays pour intégrer l'électricité d'origine renouvelable, maîtriser les consommations énergétiques et éviter les pannes.

D'une façon générale, les principaux enjeux sont :

- réaliser des économies d'énergie en fournissant au client final des informations et des outils de maîtrise de ses consommations ;
- lutter contre le réchauffement climatique en offrant une alternative à la construction de moyens de production de pointe généralement émetteurs de CO<sub>2</sub> et en favorisant l'insertion des énergies renouvelables ;
- éviter la consommation d'énergies fossiles en facilitant l'insertion des véhicules électriques (« vehicle to grid »), des pompes à chaleur, etc. pour adapter leur fonctionnement aux périodes les plus favorables pour la production d'énergie ;
- réduire les besoins d'investissement sur les réseaux en raison de l'accroissement de la demande électrique.

La directive européenne 2009/28 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables a fixé comme objectif pour la France une part de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation d'énergie finale

#### 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

brute, en 2020, contre 10,3 % en 2005. L'article 16 portant sur l'accès au réseau et la gestion des réseaux précise les objectifs en termes de maintien d'un niveau élevé de qualité de fourniture d'électricité et de sécurité du système électrique, dans le cadre d'un accès garanti au réseau pour l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : G2Elab (Grenoble), LEG de Grenoble, L2EP (Lille), Supelec
- **Industrie** : Alcatel-Lucent, Alstom, Atos, Delta Dore, EDF, ERDF, GDF Suez, Itron, Legrand, Nexans, Schneider-Electric, Orange, RTE, Voltalia, Watteco, Wirecom Technologies, Renault
- **Pôles de compétitivité** : S2E2, Tenerrdis

### Principaux acteurs étrangers

- ABB, Actaris, BPL Global, Cisco, GE, Google, Toshiba, Hitachi, IBM, Landis et Gyr, Microsoft, Siemens

## Position de la France

La France dispose de compétences importantes en R&D en matière de réseaux électriques avec un accompagnement fort par les pouvoirs publics par rapport à ses partenaires européens. Cependant, le déploiement des technologies de compteur intelligent est plus avancé en Italie, ou en Europe du Nord par exemple. Ce décalage est encore plus accentué avec les États-Unis sur ce sujet.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Expertise française reconnue dans l'élaboration de réseaux électriques et de systèmes de télécommunications.
- Présence d'acteurs sur toute la chaîne de valeur.
- Rôle moteur de plusieurs industriels majeurs.

### Faiblesses

- Priorités assez mal définies.
- Faiblesse sur le segment des logiciels et des services informatiques.

### Opportunités

- Soutien affirmé au niveau européen.
- Opportunités à l'international à la fois sur les marchés établis et sur les marchés émergents.

### Menaces

- Difficultés à mobiliser les investissements à un niveau suffisant.

## Recommandations

Le développement des technologies permettant le stockage électrique sur le réseau nécessitera un volontarisme fort.

Concernant le déploiement des compteurs intelligents, un effort pédagogique et un système d'incitation financière sont nécessaires pour en améliorer l'acceptation par le grand public. La transparence et la sécurité des données doivent être assurées.

Des démonstrateurs de recherche intégrant également la dimension socio-économique sont à mettre en place ; ils seront dimensionnés pour constituer de réelles preuves de faisabilité.

## Liens avec d'autres technologies clés

51

### 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



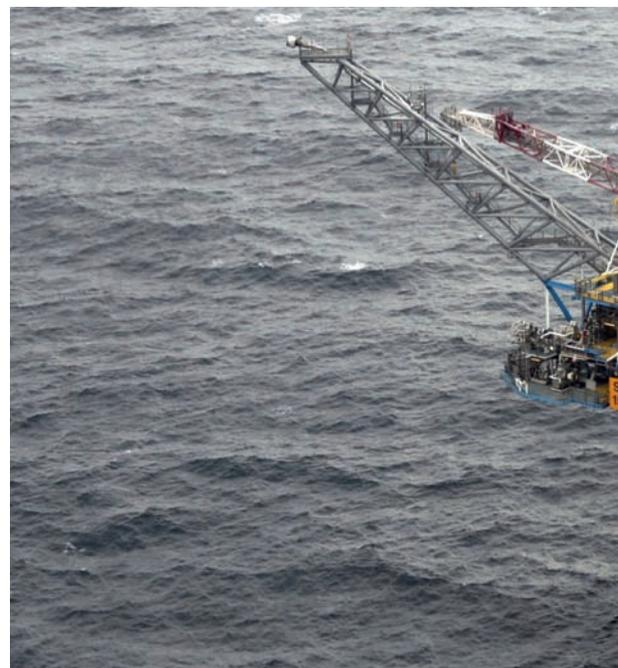
## 53. Technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures

### Description

Les technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures recouvrent le cycle de vie d'un champ pétrolier ou gazier dont les principales étapes sont : l'exploration du site, l'évaluation des voies d'extraction des ressources, le plan de développement du champ, la production proprement dite lorsque les premières quantités commerciales d'hydrocarbures sont extraites et enfin le décommissionnement du champ au bout de généralement 20 à 40 ans afin de restaurer le site. Les techniques mises en œuvre portent sur les examens d'exploration selon les méthodes magnétique, gravimétrique et sismique ainsi que sur les techniques liées aux forages d'exploration du réservoir, d'estimation des ressources, de production des hydrocarbures qui nécessitent de l'instrumentation, des systèmes de modélisation, des systèmes de pompage, d'injection de gaz et d'eau, de traitement des déchets et de l'eau.

Les efforts actuels portent sur la prolongation de l'exploitation des gisements d'hydrocarbures conventionnels, la réduction de l'impact environnemental de l'exploration-production et le développement de l'accès aux hydrocarbures non conventionnels. Plusieurs verrous liés à ces axes restent à lever, notamment afin de :

- augmenter le taux de succès dans l'activité d'exploration (25 % actuellement) par l'imagerie sismique du sous-sol, la simulation de la formation et de la circulation du pétrole ;
- accroître le taux de récupération (35 % actuellement) et la réduction des coûts opératoires des champs matures par le développement de l'instrumentation, des logiciels et des procédés (injection de gaz, d'additifs, de vapeur) ;
- explorer et développer de nouveaux champs pétroliers et gaziers dans des environnements complexes et fragiles – en zone arctique, en mer (offshore profond et ultra profond – au-delà de 3 000 m), dans les réservoirs à haute pression et haute température (au-delà de 1 000 bar et 150° C), réservoirs très enfouis (au-delà de 6 000 m) – qui nécessiteront la mise au point de nouveaux concepts de production (forage profond et ultra profond, modélisation numérique, imagerie ultraprofonde...), l'amélioration des techniques d'imagerie sismique pour observer sous les couches de sel et les zones plissées, et des matériaux aux propriétés mécaniques et thermiques adaptées ;
- améliorer les méthodes de récupération des hydrocarbures non conventionnels (sables bitumineux, huiles lourdes et extra lourdes, schistes bitumineux, gaz issus de gisement de charbon, gaz de schiste, etc.) par injection continue de vapeur d'eau, de solvant et la combustion *in situ* ainsi qu'un monitoring fin du réservoir asso-



cié à une modélisation en temps réel ;

- réduire les émissions de gaz à effet de serre et la réduction de l'impact environnemental de l'exploration-production par le captage et stockage du CO<sub>2</sub>, par la gestion et le retraitement des gaz résiduels, de l'eau, du SO<sub>2</sub> ;
- améliorer les procédés de production de carburants liquides à partir du gaz.

### Applications

Ces technologies sont dédiées à la production de carburants pour le secteur des transports (terrestres et aériens), de combustibles pour la production d'électricité et de chaleur ainsi que de matières premières pour l'industrie pétrochimique.

Ce sont des technologies avancées qui mobilisent des compétences multiples : géologie, géophysique, ingénierie pétrolière, sciences et technologies de l'information et de la communication, mathématiques appliquées, mécanique des fluides, sciences du vivant, nanotechnologies...

La production d'hydrocarbures devrait croître de 60 % au cours des vingt prochaines années pour atteindre près de 9 Gtep en 2020 [source : AIE]. La nécessité d'accroître les capacités de production, la hausse des prix du brut et l'accès de plus en plus difficile aux réserves entraînent une forte demande de la part des compagnies pétrolières en équipements et services pour l'exploration-production.

Les investissements pétroliers en exploration et production dans le monde sont évalués à 400 Md\$ en 2009

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



[source : IFP Énergies nouvelles] et devraient être stables ou croître légèrement de 5 % au maximum en 2010. Les principales zones d'investissements en exploration-production sont en Amérique du Nord, en Asie et en Afrique.

Le marché est structuré entre trois types d'acteurs : les compagnies pétrolières dominées par les cinq majors (ExxonMobil, BP, Shell, Chevron et Total) produisant et commercialisant les hydrocarbures extraits, les sociétés parapétrolières offrant leurs services pour les activités d'exploration, de forage et de construction en mer (plateforme, installations sous-marines) et les États pétroliers détenant les réserves. Environ 85 % des réserves sont sous contrôle des compagnies nationales.

## Enjeux et impacts

Le contexte pétrolier et parapétrolier se caractérise par des tendances lourdes : accès aux réserves de plus en plus difficiles, abondance de projets de développement de plus en plus complexes et montée durable des prix des hydrocarbures.

Le gaz et le pétrole représentent 60 % de l'énergie primaire. L'exploitation des ressources non conventionnelles est devenue un enjeu majeur, mais leur impact environnemental risque d'être très important.

La dépendance de l'Union européenne de l'importation de gaz naturel va s'accroître : en 2020, elle sera dépendante pour les deux tiers de sa consommation et dès 2030 ce niveau atteindra plus de 80 % [source : IFP Énergies nouvelles].

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Énergies nouvelles
- **Industrie** : CGGVeritas, Doris Engineering, GDF Suez, Saipem, Technip, Total, Vallourec

### Principaux acteurs étrangers

- Baker Hugues, BP, Chevron, ExxonMobil, Halliburton, Helmerich, Nabors, PGS, RDSHELL, Schlumberger, WesternGeco

## Liens avec d'autres technologies clés

46

56

## Position de la France

L'industrie parapétrolière française occupe aujourd'hui le quatrième rang mondial dans son secteur d'activité et compte en son sein des acteurs de taille internationale, tels que CGGVeritas, Doris Engineering ou Technip.

Par ailleurs, l'industrie parapétrolière française s'appuie sur l'existence de compagnies pétrolières et gazières de rang mondial dont les centres de décision sont en France. Ainsi, Total est la quatrième compagnie pétrolière mondiale et GDF Suez figure parmi les cinq premières compagnies gazières mondiales.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Positionnement parmi les leaders.

### Faiblesses

- Absence d'investissements sur la zone Europe.

### Opportunités

- Baisse des coûts en cours et reprise de la demande mondiale.
- Existence d'opportunités importantes nécessitant des technologies toujours plus complexes.

### Menaces

- Secteur cycliquement touché par le ralentissement général de l'économie.
- Montée en puissance des pays émergents (Brésil, Chine).

## Recommandations

Afin d'accompagner le développement de la filière, il est nécessaire de soutenir la formation des compétences nécessaires à la géophysique, au forage et à la construction en mer.

### 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



# 54. Technologies de raffinage des hydrocarbures

## Description

Les techniques de raffinage permettant la fabrication de produits pétroliers à partir de ressources conventionnelles ou non conventionnelles sont de trois grands types :

- les procédés de séparation : distillation atmosphérique, distillation sous vide, désasphaltage, extraction et cristallisation ;
  - les procédés de conversion : reformage, alkylation, isomérisation, craquage catalytique, hydrocraquage et viscoréduction ;
  - les procédés d'épuration : dessalage et désulfuration.
- Ces technologies recouvrent les principales étapes permettant la transformation d'un mélange d'hydrocarbures en carburants, combustibles et matières premières pétrochimiques.

Les principaux développements portent sur le développement de nouveaux procédés afin d'améliorer l'efficacité énergétique, d'intégrer des bruts plus lourds et des huiles non conventionnelles, ainsi que de réduire les impacts sur l'environnement. Les verrous technologiques concernent :

- le développement des techniques de conversion profonde, d'hydrocraquage des bruts, des résidus et des distillats ;
- la réduction des teneurs en soufre et en aromatiques ;
- la mise au point de nouveaux catalyseurs à hautes performances ;
- l'amélioration des rendements des procédés pétrochimiques et la pureté des intermédiaires.

## Applications

Ces technologies sont dédiées à la production de produits pétroliers tels que les carburants, les intermédiaires pétrochimiques.

Des plus légers aux plus lourds : gaz de pétrole liquéfié (butane, propane, etc.), supercarburants, bases pétrochimiques (gaz, naphta), solvants (white spirit, pétrole lampant), carburéacteurs (kérosène), gazole, fioul domestique, lubrifiants, cires et paraffines, fioul lourd, bitumes et bases chimiques.

Le secteur du raffinage regroupe 10 000 emplois directs en France [source : MEEDDM] et est caractérisé par sa forte concentration autour de cinq opérateurs (Esso, Ineos, Lyondellbasell, Petroplus et Total) exploitant 12 usines (sur 661 dans le monde) qui ont traité 73,7 millions de tonnes de brut en 2009 [source : UFIP].

Les dépenses mondiales de l'industrie du raffinage se sont élevées à 62 Md€ en 2008 [source : IFP Énergies nouvelles], dont environ un tiers pour les investissements et un autre tiers pour les catalyseurs et produits chimiques. La

demande de produits raffinés devrait continuer à augmenter, mais les capacités de raffinage dans le monde sont supérieures à la demande mondiale et devraient le rester, si l'on intègre les projets en cours à moyen terme. Une restructuration du secteur est attendue en Europe et aux États-Unis avec une baisse des capacités de raffinage et des investissements pour répondre aux renforcements des spécifications et normes d'émissions.

Les orientations structurelles du secteur sont :

- une forte décroissance du fioul lourd ;
- la poursuite de la diésélisation du parc automobile, notamment en Europe ;
- la réduction de la demande en essence ;
- une hausse de la demande en kérosène ;
- le renforcement des spécifications sur la qualité des produits (teneur en soufre) ;
- le renforcement des réglementations pesant sur les raffineries : réduction des niveaux de pollution locale en SO<sub>2</sub>, NOx, CO, etc. et globale pour le CO<sub>2</sub> essentiellement.

## Enjeux et impacts

Le maintien d'une industrie du raffinage performante constitue un enjeu européen et national, en particulier pour des raisons de sécurité d'approvisionnement. Le développement de la filière passe par la diminution des impacts environnementaux lors des étapes de production, l'amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que l'intégration dans l'approvisionnement de bruts



### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

plus lourds et à terme de pétroles non conventionnels. La diminution des émissions de CO<sub>2</sub> repose largement sur l'amélioration de l'efficacité dans l'emploi des hydrocarbures. Les émissions de CO<sub>2</sub> du raffinage en 2008 ont représenté 4,7 % des émissions globales françaises [source : CITEPA] et elles augmentent de 2 % par an par tonne de brut traité. L'autoconsommation des raffineries est en croissance et atteint 7 % du brut traité en 2008 [source : UFIP]. Aux États-Unis, où les procédés de conversions profondes de fioul lourd sont plus développés, ce pourcentage atteint 11 à 13 %.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Énergies nouvelles, ENS-Lyon, ENSC Rennes, CRMCN (Marseille), IPCM (Strasbourg), IrceLyon, Lacco (Poitiers), Laiman (Annecy), LCC (Toulouse)
  - **Industrie** : Axens, Prosernat, Technip, Total
- Pôle de compétitivité : Axelera

### Principaux acteurs étrangers

- ABB, Actaris, BPL Global, Cisco, GE, Google, Toshiba, Hitachi, IBM, Landis et Gyr, Microsoft, Siemens

## Position de la France

La France compte avec Total un des principaux acteurs du secteur raffinage distribution en Europe et dans le monde. La filière raffinage mobilise des acteurs français, sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

Il existe un écart grandissant entre la capacité de production nationale du raffinage et les besoins du marché, nécessitant l'importation de 40 % du gazole consommé en France et l'exportation de 30 % de la production d'essence et de 70 % de la production de fioul lourd (source : UFIP).

## Analyse AFOM

### Atouts

- Implication d'acteurs majeurs à forte capacité d'investissement.

### Faiblesses

- Positionnement structurel des capacités sur le raffinage d'essence en retrait par rapport au diesel.

### Opportunités

- Importants projets dans les zones à forte croissance de consommation (Asie).

### Menaces

- Surcapacités de raffinage en Europe (première zone de raffinage mondiale).

## Liens avec d'autres technologies clés

5

53

56

## Recommandations

Dans ce contexte, les pistes de réflexion sont les suivantes :

- soutenir les projets de développement de raffinage visant à améliorer l'efficacité énergétique des procédés et à réduire leur impact environnemental ;
- garantir des infrastructure logistiques et portuaires compétitives ;
- améliorer la visibilité sur les réglementations à venir tout en limitant l'empilement des nouvelles mesures.

### Maturité (échelle TRL)

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

### Position de la France

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

### Potentiel d'acteurs en France

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





## 55. Technologies pour l'exploration, l'extraction et les traitements des ressources minérales

### Description

Les ressources minérales peuvent être classées en trois familles de produits et nous nous intéresserons ici principalement à la première :

- les métaux ;
- les minerais extraits pour la construction (calcaire, sable, pierre naturelle, marbre, schiste...);
- les minéraux à vocation énergétique (uranium...).

Les risques de pénurie et d'épuisement des gisements de ressources minières impliquent d'en découvrir de nouveaux. Pour cela, il est nécessaire de développer des systèmes de prospection aussi performants que pour le pétrole. Les métaux ne se trouvent pas qu'en surface : une fois les gisements détectés, il reste encore à extraire les minerais et à les traiter afin d'obtenir le métal convoité.

La recherche de métaux toujours moins accessibles nécessite par conséquent le développement de nouvelles technologies pour chacun de ces trois stades :

- l'exploration de nouveaux gisements avec des systèmes géophysiques aéroportés, des équipements toujours plus sophistiqués de télédétection, des capteurs, l'imagerie par satellite.
- l'extraction : la découverte de nouveaux gisements moins « classiques » que ceux exploités depuis vingt ou trente ans va nécessiter le développement de nouvelles techniques d'extraction. On peut citer à titre d'exemple l'exploitation des grands fonds marins avec des besoins notamment en robotique.
- le traitement des minerais : la voie biologique est à explorer. La biolixiviation se sert des micro-organismes pour transformer les minéraux solides en une forme soluble et permet au minéral de se séparer de la matière solide qui l'entoure. Ainsi certaines souches de bactéries sont très efficaces pour désagréger le minéral sulfuré : elles sont donc utilisées pour départager l'or des roches pyritiques et pour la lixiviation biologique du cuivre<sup>17</sup>, du cobalt 20. De plus, la plupart des procédés de traitement commencent par une opération de broyage fin qui est très énergivore. Des recherches vers de nouvelles techniques de comminution plus efficaces sont à développer.

### Applications

Les métaux trouvent leurs usages dans tous les secteurs de l'industrie ou presque.

Les plus beaux gisements de ressources minérales ont été découverts dans les années 1970-1980 et exploités intensivement entre 1986 et 2006 environ. Les prix étaient alors bas pour des ressources abondantes. Depuis, les ressources s'amenuisent, notamment parce que la Chine importe massivement. Les cours ont donc fortement aug-

menté. La crise a légèrement stoppé cette flambée des prix, mais celle-ci demeure latente.

Il devient donc indispensable de découvrir de nouveaux gisements, plus difficilement accessibles peut-être. La Chine s'est aussi mise à chercher des gisements.

Excepté le nickel de Nouvelle-Calédonie, la production de minerai a disparu en France.

### Enjeux et impacts

Les phénomènes croisés d'épuisement des gisements exploités jusqu'à présent et d'explosion des besoins (depuis 2006) constituent un enjeu à l'échelle mondiale : celui de garantir la production.

La hausse des coûts des matières premières est liée à l'épuisement des gisements, mais parfois aussi à des contextes géopolitiques tendus, plus ou moins difficiles à prévoir. Pour ces raisons, trouver de nouveaux gisements à exploiter fait partie des solutions qui permettraient de sécuriser les approvisionnements de ces matières premières. Une autre solution passe par des efforts à mener sur le recyclage des métaux (notamment rares) : certains parlent alors de l'exploitation des nouvelles « mines urbaines », *i.e.* les déchetteries.

Les techniques de traitement des minerais doivent être améliorées car leur impact sur l'environnement est conséquent. Au Canada par exemple, pour chaque tonne de cuivre extraite, 99 tonnes de matières superflues (roche ne contenant pas de minerai) sont produites. L'industrie minière canadienne produit donc à elle seule 1 650 000 tonnes de matières superflues par jour générant ainsi 650 millions de tonnes de déchets par an. Or les roches sont bien souvent traitées à l'acide afin d'extraire les minéraux. Les roches superflues contiennent des sulfures provenant de l'acide, des métaux lourds et d'autres polluants. Elles sont ensuite entassées sur de vastes étendues près des mines, exposées à l'air et à l'eau. De l'acide sulfurique peut être généré et filtrer de la roche pendant des centaines, voire des milliers d'années. Il s'infiltrer dans les cours d'eau, les nappes... C'est le phénomène de drainage minier acide (DMA). L'eau peut aussi être contaminée par les métaux (arsenic, cobalt, plomb, cadmium...) et par les produits chimiques utilisés sur le site. Il est aussi très important de bien étudier le site et de limiter l'impact de l'érosion et de la sédimentation.

En plus de la pollution, la quantité d'eau nécessaire au traitement des minerais est aussi très importante. Mais il n'est pas nécessaire d'utiliser de l'eau potable pour ces traitements : la qualité de l'eau doit être adaptée à l'usage.

Sous l'impulsion de l'Allemagne, l'Europe a lancé le programme RMI (*Raw Material Initiative*) pour :

#### Degré de diffusion dans l'absolu

	Faible diffusion
	Diffusion croissante
	Généralisation

#### Degré de diffusion en France

	Faible diffusion
	Diffusion croissante
	Généralisation

- le développement d'entreprises minières en Europe ;
- le développement des relations avec l'Afrique ;
- la prise en compte des problèmes d'environnement et de recyclage.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- BRGM, Ifremer, Mines Paris Tech
- Eramet, Areva (Business Unit Mines), Imerys.
- Pôle Dream Eau & Milieux, pour les aspects réduction des volumes d'eau utilisés et réduction des impacts environnementaux

### Principaux acteurs étrangers

- BHP Billiton, Vale S. A., Rio Tinto, ArcelorMittal, Anglo American Plc, Xstrata Plc, RWE AG, Mitsubishi Corp, Barrick Gold Corporation, Potash Corporation of Saskatchewan Inc., Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc, Southern Copper Corp, Mosaic Co, Sasol Ltd, Newmont Mining Corp, Wesfarmers LTD...

## Position de la France

On trouve des acteurs américains, australiens, canadiens et suédois mais quasiment pas d'acteurs français. Les Suédois et les Finlandais sont équipés d'équipements géophysiques aéroportés mais on ne trouve pas l'équivalent ailleurs en Europe. Ils investissent aussi dans les équipements d'extraction et notamment dans la robotique, qui permet de travailler plus longtemps. La France est donc globalement en retard, du moins sur la présence d'acteurs industriels.

## Analyse AFOM

### Atouts

Le savoir-faire du BRGM qui souhaite créer son école.

### Faiblesses

Peu d'acteurs, pas de gisements sur le territoire.

### Opportunités

Le programme européen RMI.

### Menaces

Concurrence des pays étrangers qui, de plus, bénéficient parfois de gisements sur leur propre territoire (Canada, USA...).

## Recommandations

En France, le développement de programmes ANR pourrait permettre de renforcer la position française sur ce volet.

Sur le volet formation, une action structurante est à mener pour pallier une raréfaction des compétences disponibles dans le domaine des géosciences.

Le renouveau d'attention apporté aux terres rares eu égard à leur emploi croissant dans des technologies énergétiques (batteries) et non énergétiques, doit être encouragé.

## Liens avec d'autres technologies clés

13

31

36

37

40

### Maturité (échelle TRL)

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

### Position de la France

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

### Potentiel d'acteurs en France

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



## 56. Carburants de synthèse issus de ressources fossiles

### Description

Les carburants de synthèse liquides sont produits à partir de ressources telles que le charbon (CtL : « Coal to Liquids ») ou le gaz naturel (GtL : « Gas to Liquids »). Ces filières reposent sur des procédés thermochimiques et catalytiques.

Les procédés CtL et GtL reposent sur la conversion par voie thermochimique qui peut être directe ou indirecte. Dans les deux cas, l'objectif est d'augmenter la proportion d'hydrogène du composé initial par rapport aux atomes de carbone (H/C) à un coût énergétique raisonnable.

La liquéfaction indirecte requiert une première étape de pyrolyse-gazéification à partir du charbon. Lorsque la matière première est du gaz naturel, cette étape n'est pas nécessaire. Le gaz naturel est converti par reformage dans un gazéifieur à 1 400 - 1 600°C en gaz de synthèse (H<sub>2</sub> + CO). Il est ensuite purifié et transformé en hydrocarbures liquides (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>) par synthèse Fischer-Tropsch (FT). Après séparation et raffinage, les carburants liquides ont des propriétés similaires au diesel ou au kérosène. D'autres composés tels que le méthanol ou le diméthylether (DME) peuvent être synthétisés.

La transformation directe du charbon consiste à pulvériser le charbon solide et à le mélanger à un solvant pour le liquéfier à 400-450° C. Le liquide obtenu est hydrogéné et raffiné pour obtenir du carburant liquide.

Le rendement des procédés dépend notamment de la qualité des matières carbonées utilisées. Pour le CtL, le rendement peut atteindre 60 % en masse [source : AIE].

Bien que les technologies CtL et GtL soient commercialisées, de la recherche est nécessaire dans la chaîne de traitement (purification), ainsi que pour diminuer les coûts et améliorer le rendement des procédés et augmenter la qualité des carburants synthétisés par l'optimisation des catalyseurs lors de la synthèse Fischer-Tropsch. Le captage de CO<sub>2</sub> est également un axe de recherche : environ une tonne de CO<sub>2</sub> étant émise pour chaque baril CtL produit.

### Applications

Les carburants synthétisés issus du CtL sont principalement employés pour le secteur automobile. Ils sont particulièrement recherchés par les pays ayant des ressources en charbon et relativement peu ou pas en hydrocarbures (Afrique du Sud, Australie, Chine).

Les produits issus de la voie GtL relèvent d'une autre logique, ils sont surtout utilisés pour produire du naphta,

des lubrifiants et des carburants synthétiques pour la formule 1 ou l'aéronautique.

Le marché est actuellement embryonnaire, plusieurs projets au niveau international sont en cours.

Le coût d'une usine de liquéfaction est de l'ordre de 5 Md\$ [source : AIE]. La plus grande usine de liquéfaction de gaz est en construction au Qatar par Shell, elle devrait produire jusqu'à 140 000 barils par jour. Son coût initial de 5 Md\$ a été revu à la hausse au cours du chantier et pourrait atteindre 19 Md\$ [source : Shell]. Le retour sur investissement est très dépendant du cours du pétrole.

La maîtrise des émissions de CO<sub>2</sub> est un facteur clé pour le développement du marché [source : AIE Energy Technology Network]. Les usines CtL demandent à être implantées de façon proche des sources d'approvisionnement en charbon. Une seconde contrainte d'implantation est la proximité de zones de stockage du CO<sub>2</sub> capturé, lorsque cette technologie sera disponible : réservoirs épuisés de pétrole ou de gaz, puits de pétrole à taux de récupération amélioré (EOR). Le dernier cas représente une voie de valorisation, l'injection de CO<sub>2</sub> permettant d'améliorer le taux de récupération d'hydrocarbures dans le réservoir.

Le CtL devient économiquement rentable à partir d'un prix du baril de pétrole de 60 à 100 \$ [source : AIE], en tenant compte de paramètres tels que le prix et de la qualité du charbon, de l'emplacement de l'usine. Une usine CtL produisant 60 000 barils de diesel ou d'essence par jour nécessite un investissement de 4,1 Md\$ [source : ETSAP AIE], tandis qu'une usine GtL devrait coûter moitié prix, étant donné que les étapes de préparation et de gazéification du charbon représentent 50 % du coût total d'une installation. Pour être complets, il est nécessaire d'intégrer dans le coût du CtL les émissions de CO<sub>2</sub> qui sont associées à sa production.

L'AIE estime qu'à partir de 2030, la production de CtL devrait augmenter significativement et qu'en 2050 environ 2 000 Mtep de charbon seront consommés par les usines CtL. La production de GtL augmentera également. Les principaux projets d'usines CtL sont aux États-Unis et en Chine.

La production de carburant à partir de charbon est évaluée à 60 000 barils par jour en 2015 aux États-Unis [source : US Energy Intelligence Agency] et à 740 000 barils par jour en Chine [source : China Coal Information Institute]. Le principal pays producteur de carburants CtL reste néanmoins à ce jour l'Afrique du Sud, dont 30 % des besoins en produits pétroliers sont couverts par cette filière.

#### 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

## Enjeux et impacts

La volatilité des cours du baril de pétrole et des considérations de sécurité d'approvisionnement en énergie stimulent l'intérêt pour les carburants de synthèse liquides. Le principal enjeu est la substitution des carburants de synthèse aux carburants issus d'hydrocarbures liquides.

Une évaluation complète des coûts, intégrant les coûts d'extraction environnementaux est nécessaire pour s'assurer de la rentabilité des procédés. Du point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>, le bilan du puits à la roue du CtL est [source AIE] :

- 560 g de CO<sub>2</sub>éq/km sans captage et séquestration du CO<sub>2</sub>, soit environ le double du diesel ;
- 300 g de CO<sub>2</sub>éq/km avec captage et séquestration du CO<sub>2</sub>.

Le développement de la filière se fera à l'international, notamment en Chine et en Inde qui coopèrent dans le cadre de projets de développement.

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Énergies nouvelles
- **Industrie** : Air Liquide/Lurgi, Axens, Total

### Principaux acteurs étrangers

- BP, Headwaters Technology Innovation Group, Sasol, Shell, Uhde (ThyssenKrupp)

## Position de la France

La France dispose d'acteurs majeurs dans le domaine de la production de carburants de synthèse et le transfert entre recherche et industrie est développé. Néanmoins, la plupart des projets sont implantés à l'international, notamment en Afrique du Sud qui occupe une place de leader, et de plus en plus en Chine et aux États-Unis.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Synergie entre les compétences académiques et l'industrie.
- Implication d'acteurs majeurs.

### Faiblesses

- Faible nombre d'acteurs.
- Absence de gisements exploités de gaz ou de charbon sur le territoire.

### Opportunités

- Un marché mondial en développement.

### Menaces

- Filière structurée et déjà exportatrice en Afrique du Sud.

## Recommandations

Face à l'émergence de quelques grands projets industriels dans les filières CtL et GtL, il s'agit avant tout d'accompagner la structuration de la filière (réseau national) et de soutenir l'exportation des savoir-faire et des technologies.

## Liens avec d'autres technologies clés

5

53

54

### Maturité (échelle TRL)

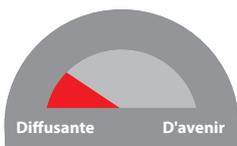
<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

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



## 57. Biomasse et déchets : valorisation énergétique



### Description

Les technologies de valorisation énergétique de la biomasse et des déchets, qu'ils soient urbains, industriels ou agricoles, relèvent de trois filières :

- L'oxydation totale par combustion, incinération ou oxydation en voie humide (OVH), qui consiste à transformer intégralement la matière de base par réaction exothermique à l'aide d'un agent oxydant - de type oxygène ou tout autre oxyde métallique - à pression atmosphérique ou sous pression, puis à traiter les effluents avant rejet dans le milieu naturel ;
- Le traitement par voie humide de la biomasse non ligneuse et des déchets par méthanisation, qui consiste en une digestion anaérobie de la matière organique réalisée dans un digesteur. Le gaz obtenu, appelé biogaz, peut servir à produire de la chaleur et/ou de l'électricité ou bien être épuré en vue d'une injection dans le réseau de gaz naturel ou d'une utilisation en biométhane carburant (composition identique en GNV). Le résidu solide (digestat) peut par exemple être, utilisé comme amendement organique en agriculture, composté ;
- La décomposition et/ou transformation thermochimique par pyrolyse et/ou par gazéification, qui consiste à décomposer, sous l'effet de la chaleur, la matière par réaction endothermique. Cette décomposition de la matière en phases solide, liquide et gazeuse constitue la pyrolyse qui peut être suivie d'une étape de gazéification en

un gaz de synthèse ( $H_2 + CO$ ) à l'aide d'un agent gazéifiant (air,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ) ;

On peut coupler ces filières aux technologies de stockage et transport de la chaleur, qui trouvent leurs applications dans plusieurs secteurs (industrie, habitat, tertiaire). Ces technologies, déjà largement déployées, font l'objet de développements pour adapter la production de chaleur à la demande par le stockage et le transport à longue distance.

Les technologies d'oxydation totale et de pyrolyse, dérivée du procédé de fabrication de charbon de bois, sont relativement matures. Des améliorations des procédés sont cependant probables ; elles apporteront une augmentation du rendement électrique et une diminution des émissions. La méthanisation est très courante en Europe du nord et commence à se développer plus largement en France. La gazéification reste moins développée. Des développements sont attendus afin de :

- améliorer le contrôle des procédés et l'efficacité ;
- purifier le gaz avant transformation en énergie ;
- adapter la conception des unités aux caractéristiques de la charge ;
- augmenter le rendement énergétique ;
- développer des solutions polyvalentes au regard de l'hétérogénéité de la charge disponible et de ses caractéristiques ;
- optimiser la logistique (filières d'approvisionnement) et l'emplacement des sites de valorisation énergétique.

### Applications

Ces technologies sont plus particulièrement destinées à la destruction des déchets et à la valorisation directe de la chaleur, et/ou la production d'électricité ou comme carburant véhicule.

L'Union européenne génère chaque année quelques deux milliards de tonnes de déchets de toutes origines, en augmentation de 10 % sur les dix dernières années. En France, la production de déchets en 2001 était de l'ordre de 22 à 25 millions de tonnes avec une croissance de 1 % par an tandis que le potentiel de déchets d'origine végétale (biomasse) pour une valorisation énergétique représente 90 millions de tonnes en France, incluant la sylviculture (17 millions de tonnes) et les déchets de l'industrie du grain (19 millions de tonnes) [source : Ademe].

Les effets de la taille sur le coût de production de l'énergie sont importants. La taille des installations varie en fonction des ressources disponibles et des caractéristiques de la demande en énergie :

- les grandes unités de production d'électricité sont supérieures à 100 MW, en co-combustion avec des combustibles fossiles ;

#### Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

#### Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

- les unités petites et moyennes de cogénération autour de 20 MW ;
- les unités de production de chaleur pour les communes.

Le marché fait l'objet de plusieurs formes de soutien public : appels d'offres pour la construction de centrales de production d'électricité à partir de biomasse ; fonds chaleur renouvelable qui vise 1 100 ktep issues de la biomasse en 2012 et 3 800 ktep en 2020 ; programmation pluriannuelle des investissements (PPI) de production de chaleur et d'électricité à partir de biogaz (filrière méthanisation).

## Enjeux et impacts

Les principaux enjeux concernent la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la contribution à l'indépendance énergétique de la France. La biomasse, hors biocarburants, représente plus du tiers du potentiel de développement des énergies renouvelables en France à l'horizon 2020, soit 7,5 Mtep sur 20 Mtep [source : MEEDDM].

En France, la biomasse est principalement utilisée pour la production thermique dans les secteurs résidentiels et tertiaire, et ensuite pour la production d'électricité. Le potentiel de biomasse mobilisable pour la production de chaleur, d'électricité et d'hydrogène et de biocarburants est estimé à plus de 30 Mtep [source : Prospective Ademe 2004].

## Acteurs

### Principaux acteurs français

- **Recherche** : Cemagref, Ceva, Fédération Jacques Villermaux, Gremi (Groupe de Recherches sur l'Énergétique des Milieux Ionisés), IFP Énergies nouvelles, Inra/LBE, LSGC Nancy
- **Industrie** : Air Liquide, Areva Bioenergies, Bionersis, Europlasma, GDF-Suez, Naskeo, Proserpol, SAUR, Veolia
- **Pôles de compétitivité** : Capenergies, DREAM Eau & Milieux, Tenerrdis

### Principaux acteurs étrangers

- Caterpillar, GE Energy, MWM, Schrack Biogas, Viessmann Werke

## Position de la France

La France dispose d'acteurs académiques et le monde de la recherche s'est structuré : l'ANR a lancé un programme bioénergies en 2008 et depuis 2005 le programme national de recherche sur les bioénergies (PNRB) coordonne les projets.

La filière française présente un retard dans le déploiement des technologies par rapport à ses partenaires européens, Allemands, Suédois et Autrichiens notamment.

## Analyse AFOM

### Atouts

- Des mécanismes de soutien sont mis en place pour soutenir la filière (BCIAT 2011).
- Un gisement de bois-énergie de premier ordre.

### Faiblesses

- Une filière atomisée sans réel leader.
- Un retard conséquent dans le déploiement des technologies (méthanisation notamment).

### Opportunités

- Localisation forte des ressources sur un territoire donné.

### Menaces

- Compétition forte des constructeurs d'équipements étrangers.

## Recommandations

La diffusion des technologies de valorisation énergétique de la biomasse et des déchets nécessite le renforcement des incitations réglementaires aux travers de la réévaluation du tarif d'achat, notamment pour l'électricité produite à partir de biogaz, à l'exemple de l'Allemagne et de la Suisse.

L'efficacité globale de la chaîne de valorisation énergétique doit être renforcée par une optimisation à chaque étape des procédés et équipements. En aval, un point sensible se situe au niveau des émissions polluantes (particules, notamment), pour lesquelles les normes d'émission tendent à devenir plus contraignantes.

## Liens avec d'autres technologies clés

3

39

### 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

- Agence internationale de l'énergie, *Energy Technology Perspectives*, 2010
- Bulletin de diffusion de l'Agence internationale de l'énergie, *ETSAP - Technology brief*, 2010. [www.etsap.org](http://www.etsap.org)
- Commissariat général au développement durable, *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, 2010. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- EurObserv'ER, *État des énergies renouvelables en Europe*, 2010. [www.energies-renouvelables.org](http://www.energies-renouvelables.org)
- Rapport du MEDEF, *Nouvelles énergies, nouvelles technologies*, 2010. [www.medef.fr](http://www.medef.fr)
- Christian Bataille et Claude Birraux, *Évaluation de la stratégie nationale de recherche en matière d'énergie*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2009
- Présentation de l'ANR, *Un premier bilan des programmes ANR sur les nouvelles technologies de l'énergie*, 2009. [www.agence-nationale-recherche.fr](http://www.agence-nationale-recherche.fr)
- Feuille de route de la Commission européenne : *SET-Plan Technology map : Technology Descriptions*, 2009
- Étude de l'OMPI, *Patent-based Technology Analysis Report - Alternative Energy Technology*, 2009. [www.wipo.org](http://www.wipo.org)
- Rapport de synthèse DGEC, *Scénario énergétique de référence DGEMP-OE*, 2008. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- Comités opérationnels du Grenelle de l'environnement, *Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale*, 2008. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- Feuille de route des énergies renouvelables de l'European Renewable Energy Council, *20% pour 2020*, 2008. [www.erec.org](http://www.erec.org)
- Rapport de la Commission énergie du centre d'analyse stratégique, *Perspectives énergétiques de la France à l'horizon 2020-2050*, 2007. [www.strategie.gouv.fr](http://www.strategie.gouv.fr)
- Ministère de l'Économie et des Finances, ministère délégué à l'Enseignement supérieur et à la Recherche, *Rapport sur la stratégie nationale de recherche dans le domaine énergétique*, 2007
- Christian Bataille et Claude Birraux, *Les nouvelles technologies de l'énergie et la séquestration du dioxyde de carbone : aspects scientifiques et techniques*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2006
- Feuille de route de l'Ademe, *Biocarburants de 2<sup>e</sup> génération*, 2010. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Appel à projet de l'ANR, *Programme bioénergies*, 2010. [www.agence-nationale-recherche.fr](http://www.agence-nationale-recherche.fr)
- Rapport de l'Agence internationale de l'énergie, *Sustainable production of second-generation biofuels*, 2009. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Concentrating solar power*, 2010. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Feuille de route de l'Ademe, *Énergies renouvelables marines*, 2010. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Feuille de route de l'European Ocean Energy Association, *European ocean energy roadmap 2010-2050*, 2010. [www.eu-oea.com](http://www.eu-oea.com)
- Feuille de route de l'Ademe, *Captage, transport et stockage géologique du CO<sub>2</sub>*, 2010. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Rapport de l'AIE au sommet du G8 de Muskoka, *Carbon capture and storage : progress and next steps*, 2010. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Carbon capture and storage*, 2009. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Rapport de la Commission européenne : *SNETP - Strategic Research Agenda*, 2009. [ec.europa.eu/research/energy](http://ec.europa.eu/research/energy)
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Solar photovoltaic energy*, 2009. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Étude de l'EPIA, *Global market outlook for photovoltaic until 2014*, 2010. [www.epia.org](http://www.epia.org)
- Étude *The European offshore wind industry - key trends and statistics 2009*, 2010. [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie *Wind energy*, 2009. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Rapport du Carbon Trust, *Offshore wind power : bid challenge, big opportunity*, 2010. [www.carbontrust.co.uk](http://www.carbontrust.co.uk)
- Note de synthèse du bureau de coordination énergie éolienne, *L'éolien offshore en Allemagne*, 2009.
- Présentation du BRGM, *La géothermie en Europe et dans le monde*, [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)
- Présentation du BRGM, *France 2025 - diagnostic stratégique : ressources rares et environnement*, [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)
- Étude de Geothermal Energy Association, *Geothermal energy : international market update*, 2010. [www.geothermal-energy.org](http://www.geothermal-energy.org)
- Présentation de Bernard Multon, *Stockage de l'énergie électrique pour la production décentralisée d'électricité*, 2009
- Feuille de route de l'Ademe, *Les réseaux et systèmes électriques intelligents intégrant les énergies renouvelables*, 2010. [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)
- Rapport de la Commission européenne : *European smartgrids technology platform : vision and strategy for Europe's electricity networks of the future*, 2006. [ec.europa.eu/research/energy](http://ec.europa.eu/research/energy)
- Rapport du MEEDDM, *L'industrie pétrolière et gazière en 2009*, 2010. [www.developpement-durable.gouv.fr](http://www.developpement-durable.gouv.fr)
- Rapport de l'IFP Énergies nouvelles, *Les investissements en exploration-production et raffinage*, 2009. [www.ifp.fr](http://www.ifp.fr)
- Communication de l'UFIP, *Les mutations du raffinage français*, 2010. [www.ufip.fr](http://www.ufip.fr)
- Actes de colloque Agence internationale de l'énergie/CIAB : *Coal-to-liquids - an alternative oil supply ?* 2006. [www.iea.org](http://www.iea.org)

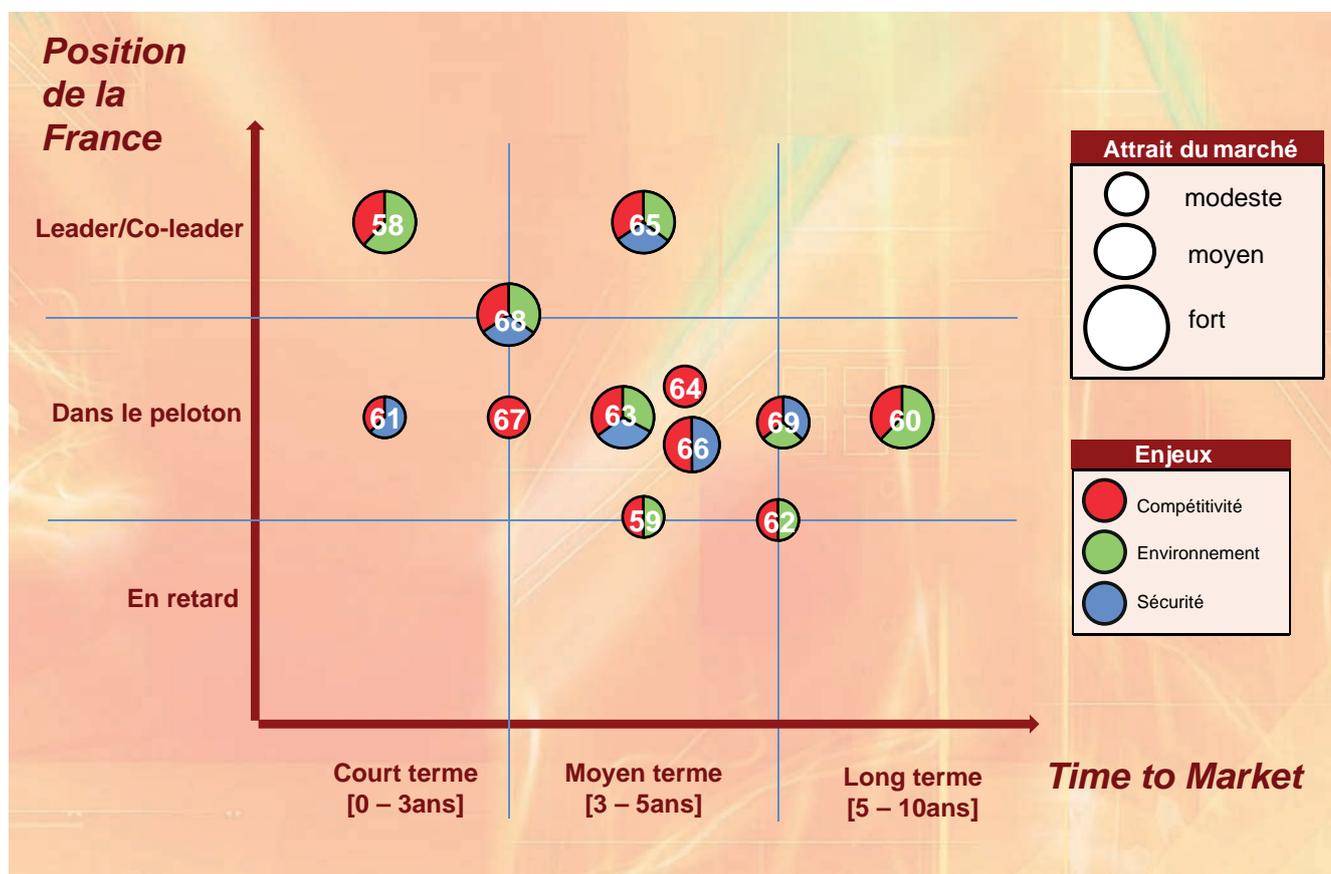


# Train sports



# 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].



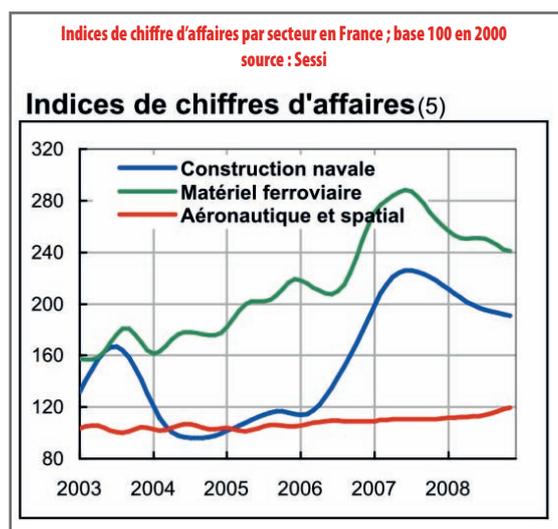
Les acteurs français sont des leaders mondiaux dans l'industrie : EADS (Airbus, Eurocopter, Astrium...), Zodiac, Safran (Snecma, Hispano-Suiza, Messier-Bugatti...), Dassault Aviation, ArianeSpace, Thales, Onera...

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 ArianeSpace 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.



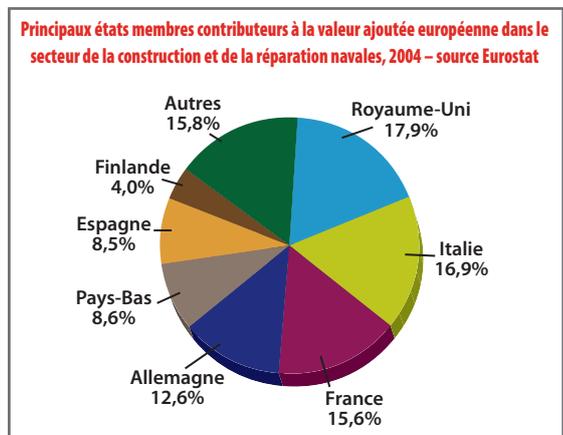
Le paysage industriel français est structuré autour de quelques grands constructeurs français (Alstom) ou étrangers (Bombardier, Siemens transportation), et d'équipementiers (Faiveley, Neotec...).

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<sup>er</sup> janvier 2010, en forte hausse par rapport à début 2009.

## Le transport et la logistique

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].

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.

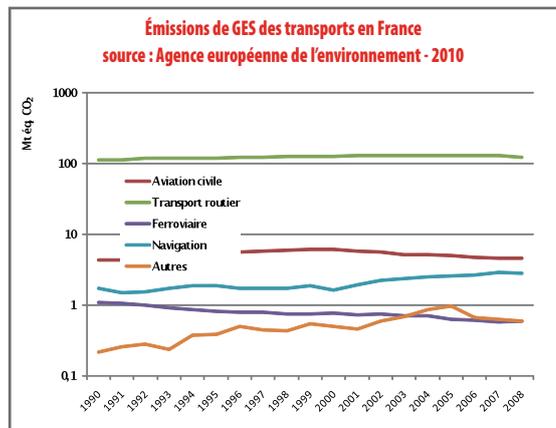
Le transport représente 46 % des emplois de la filière transports et logistique qui totalisait en 2006 1,6 million d'emplois [5.6].

## 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 :

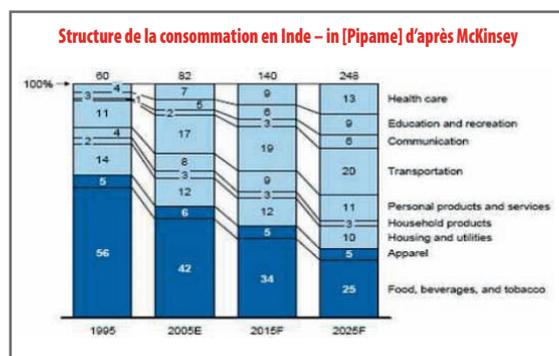
- les coûts de main d'œuvre ont provoqué depuis de nombreuses années et continuent à induire dans l'industrie des transports, en particulier automobile, des délocalisations nombreuses, notamment pour la fabrication des petits véhicules sur lesquels les marges sont les plus faibles. Ces délocalisations, 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<sup>e</sup> 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 CO<sub>2</sub> à travers l'amélioration du rendement énergétique et la diminution des émissions de polluants, tout en adaptant les moteurs aux carburants à moindre impact CO<sub>2</sub>, 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.

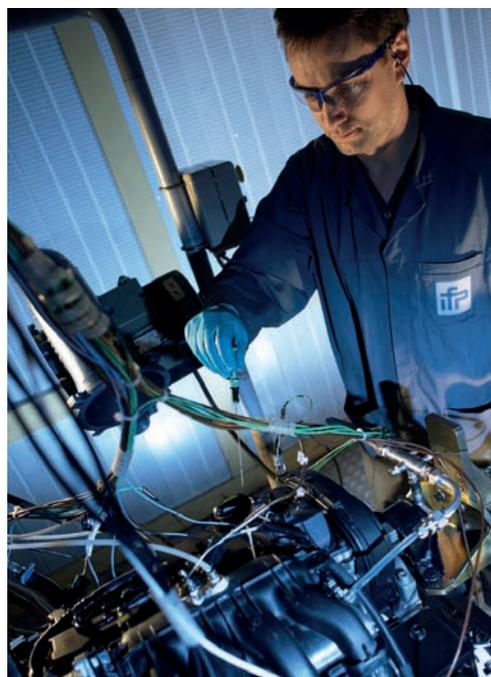
## Acteurs

### 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

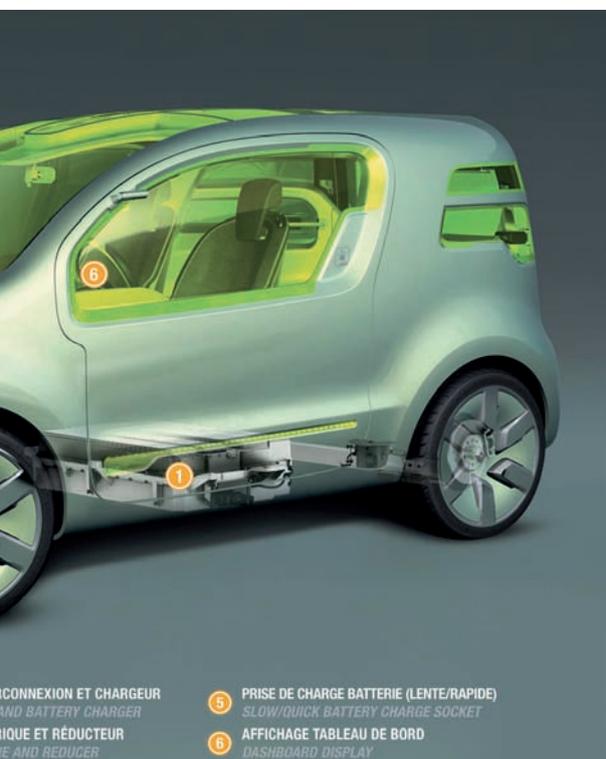
● Généralisation

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