



37. Technologies pour le recyclage des matériaux rares et leur valorisation

Définitions

Outre les déchets électroniques, on retrouve ces matériaux rares dans les boues, les effluents, les déchets de raffinage, et dans les alliages.

Description

L'appellation « matériaux rares » regroupe les métaux rares (titane, cobalt, vanadium, molybdène, tantale, césium, rubidium, tungstène, métaux précieux : or, argent, platine, palladium) et les terres rares. On les retrouve essentiellement dans l'électronique.

Des procédés de recyclage existent mais aucun ne semble complètement développé commercialement. Il s'agit essentiellement de technologies de concentration :

- des technologies aqueuses dont l'inconvénient est de produire des oxydes métalliques mixtes ou des fluorures qui sont ensuite aussi chers à purifier que le minerai original ;
- le raffinement par procédé électro-laitier qui fonctionne bien pour les grandes pièces mais moins pour les déchets contaminés ou se présentant sous forme de copeaux ou de grains. De plus, les métaux de transition se retrouvent fréquemment dans les produits finaux ce qui nécessite une purification ultérieure supplémentaire ;
- l'extraction métallique liquide : procédé prometteur car il accepte les multi-métaux. Le principe est maîtrisé mais il reste maintenant à l'appliquer aux terres rares ;
- le four à pyrolyse permet de séparer les plastiques et métaux composant les cartes électroniques, les métaux ainsi concentrés pouvant par la suite subir différents traitements de séparation, purification.

D'autres procédés expérimentaux sont à l'étude comme par exemple la récupération des oxydes de néodyme, de cérium et de lanthane à partir des déchets de production. Cela permet de recycler les effluents industriels, et de produire du titane et des terres rares avec un taux de récupération variant entre 60 et 80 %. Un procédé de réduction des déchets miniers en nanofractions, d'une taille de 1 000 nm, traitées en solution aqueuse, permettrait de récupérer des matériaux rares présents à des concentrations deux à trois fois inférieures aux taux habituels d'extraction [43].

La faisabilité technique de ce type de technologies est déjà en partie démontrée mais il subsiste de nombreux verrous technologiques à lever :

- les faibles quantités présentes de ces matériaux rares dans les appareils électroniques rendent difficile leur récupération : il est nécessaire perfectionner les techniques de concentration de ces matériaux ;
- des techniques efficaces de séparation doivent permettre de séparer les matériaux rares des alliages qu'ils composent ;
- les technologies existantes présentent généralement soit des problèmes de coûts élevés, soit de faible rendements, voire même les deux et peuvent donc être améliorées dans ce sens ;

• l'obligation pour toute la filière (collecte, tri, traitement) à s'adapter rapidement à la forte instabilité du gisement qui évolue dans le temps.

Les technologies relatives à l'extraction des matériaux rares des déchets sont aussi liées au tri des déchets. Celui-ci constitue une première étape de préparation des déchets, traités ensuite pour en extraire les matériaux rares, en vue de leur valorisation.

En ce sens, l'éco-conception doit aussi permettre de « penser » les produits en amont, de manière à faciliter la récupération des matériaux rares les composant lorsqu'ils arrivent en fin de vie.

Applications

Les métaux rares sont présents en faible quantité à l'état naturel. Avec les terres rares, ils sont utilisés dans les technologies de pointe (moteurs de voiture, électronique, industrie militaire, nucléaire). Ils sont aussi fortement liés aux technologies vertes, trouvant des applications en catalyse, dans les énergies renouvelables, le stockage de l'énergie, les superalliages...

125 000 tonnes de terres rares sont produites chaque année. Rien que pour les terres rares, la demande augmente de 10 à 20 % par an. Le marché pèse annuellement 1,25 Md\$ et devrait représenter 3 Md\$ en 2015.

Seulement 1 % des métaux utilisés dans ces produits de haute technologie est aujourd'hui recyclé. Pour les métaux non ferreux, la seule récupération des produits en fin de vie assure 20 % des besoins.

Enjeux et impacts

De par leurs vastes applications, les terres rares représentent une importante ressource stratégique.

La Chine assure 96 % de la production mondiale et en assure un contrôle strict (quotas, taxes d'exportation) pour la réserver à son industrie. Ces quotas se réduisent d'année en année, avec un possible arrêt des exportations pour certaines terres rares à l'horizon 2014-2015. Il n'y a donc pas de risque de pénurie de la ressource en tant que telle mais un risque de pénurie des terres rares disponibles pour les industries consommatrices.

Le recyclage de celles-ci apparaît donc comme un enjeu évident afin de maintenir la sécurité d'approvisionnement de certaines filières françaises, mais aussi européennes et mondiales.

L'extraction dans les gisements connus mais encore non exploités et l'exploration pour en découvrir de nouveaux sont aussi une solution à mettre en œuvre.

Les États-Unis ont inscrit les terres rares dans leur liste des matériaux critiques pour leur industrie high-tech. L'Europe a publié au mois de juin 2010 un rapport qui

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

s'inquiète de pénuries à venir pour quatorze éléments, qualifiés de « critiques » (dont l'approvisionnement pourrait subir l'impact de tensions politiques ou de pénuries). Il s'agit de : antimoine, béryllium, cobalt, fluorine, gallium, germanium, graphite, indium, magnésium, niobium, les platinoïdes (six matériaux dont platine et palladium), terres rares (17 éléments), tantale et tungstène. Un plan d'action pour sécuriser les approvisionnements de l'Hexagone a été présenté le 27 avril 2010. La sécurité de l'approvisionnement passera non seulement par le renforcement des accords avec les pays producteurs de ces métaux et par le développement du potentiel minier sur le sol européen, mais aussi par une meilleure maîtrise du recyclage.

Au rythme actuel, les ressources connues en 2010 risquent d'être taries d'ici 15 à 30 ans. Mais il est extrêmement difficile d'estimer les ressources minérales de la croûte terrestre. La prospection minière et la modélisation des réservoirs font sans cesse varier les chiffres.

La filière de collecte, de tri et de traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), opérationnelle depuis novembre 2006, peut encore être améliorée et faciliter ainsi le recyclage des matériaux rares. L'enjeu est aussi environnemental : les terres rares ne se trouvent pas pures dans les gisements mais sous forme de minerais (oxydes) qu'il faut traiter chimiquement. Or ces traitements sont réalisés directement sur site. Développer le recyclage de ces matériaux permettrait d'avoir moins recours à l'extraction elle-même et présenterait donc aussi un bénéfice environnemental.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : Lepmi, BRGM
- Umicore, Malco (recyclage des non-ferreux), Valmet, Récupyl (essaimage du Lepmi), Terra Nova, Récyclum
- Federec, Fédération des Minerais, Minéraux industriels et des Métaux non Ferreux (Fedem)
- Pôles de compétitivité Team2 et Axelera

Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : Osaka University, University of Tokyo
- Hitachi, Taivo Koko Co

Position de la France

À l'heure actuelle, le recyclage de ces matériaux rares en France est quasi inexistant : il devient urgent de se pencher sur la question de l'exploitation des « mines urbai-



nes », comme c'est déjà le cas au Japon, qui est parvenu à un rendement de 500 g d'or par tonne de composants électroniques traités.

Des actions commencent à voir le jour. L'État a mis en place un plan d'action "métaux stratégiques", qui comporte un volet recyclage dont la première action a consisté à mener une étude sur la présence de 14 métaux dans les gisements de déchets.

Le pôle Team2 ambitionne la mise en place d'une solution opérationnelle pour la captation de l'Indium d'ici à 2012. Un autre de ses objectifs est que la région Nord-Pas de Calais devienne en 2015, la première région pour la production de métaux et terres rares de récupération.

Globalement, tous les pays sont en retard sur cette question par rapport au leader, le Japon [48].

Analyse AFOM

Forces

Tissu de recherche français.

Faiblesses

La filière DEEE doit être améliorée, des incitations réglementaires pourraient être utiles.

Opportunités

Contexte géopolitique.

Menaces

Avance du Japon dont la R&D est très active.

Liens avec d'autres technologies clés

31

38

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

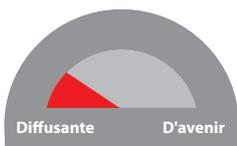
<input type="radio"/>	Leader ou Co-Leader
<input checked="" type="radio"/>	Dans le peloton
<input type="radio"/>	En retard

Potentiel d'acteurs en France

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

Recommandations

Accroître la veille réglementaire et économique est un des leviers pouvant faciliter la diffusion de ces technologies, afin de respecter et d'anticiper au mieux les dispositions réglementaires.



38. Technologies de tri automatique des déchets

Description

Le tri est une étape intermédiaire du traitement des déchets, dont la fonction consiste à transformer un flux de déchets mélangés en plusieurs fractions de déchets, dont certaines seront ensuite valorisées ou prises en charge par d'autres filières.

Les procédés de tri automatique se basent, pour les exploiter, sur les propriétés physiques des déchets permettant de les différencier les uns des autres. Ces technologies permettent notamment un meilleur rendement et une meilleure productivité du tri. Une large variété de technologies existe :

- le tri aéroulque : trommel ou séparateur hydraulique qui se base sur les différences de densité, de forme, de portance de l'air... Cette technologie intervient en tant que préparateur de flux, facilitant la séparation des déchets ;
- le tri magnétique des métaux ferreux par extraction magnétique des non ferreux par courants de Foucault ;
- le tri électrostatique pour la séparation des métaux et des plastiques par la création d'une charge électrostatique par Corona ou triboélectricité, puis séparation par attraction-répulsion ;
- le tri mécanique par criblage (séparation en fonction de la forme, de la taille...), par séparateur balistique... ;
- le tri optique par couleur : identification de matières plastiques par la couleur. Cette technologie est souvent associée à une technologie de proche infrarouge qui permet d'atteindre un niveau de détail plus important.

Globalement, toutes les grandes familles de déchets peuvent être traitées aujourd'hui par les technologies de tri automatique.

Des progrès sont désormais à réaliser au sein des sous-familles de déchets afin de les traiter de façon plus précise. Par exemple, des efforts doivent être faits sur les technologies de tri mécano-biologique (TBM) applicables notamment au gisement des ordures ménagères résiduelles, le tri industriel de déchets d'activités en mélange (encombrants de déchèterie, déchets divers du bâtiment...), le tri des recyclables « secs », papiers et emballages de collectes sélectives. Ces dernières viendraient en appui à une éventuelle extension des consignes de tri nationales des plastiques qui nécessiterait une automatisation croissante des centres de tri existants.

Applications

Bien que le tri soit traditionnellement effectué par des méthodes manuelles, certains éléments comme les métaux ou les emballages peuvent désormais être triés par des systèmes automatiques, permettant d'améliorer le taux de productivité de l'activité.

Le tri automatique a également permis d'étendre l'activité à la séparation de déchets qui ne pouvait être réalisé manuellement comme l'identification des plastiques par trieurs optiques.

De façon générale, les installations de tri associent le tri manuel et le tri automatique, notamment pour les déchets d'emballages. Plusieurs méthodes de tri sont ainsi successivement utilisées en fonction de la nature et des propriétés de la fraction à séparer : métaux, matières plastiques...

Le tri magnétique est une technologie bien maîtrisée et qui se retrouve dans la plupart des centres de tri.

En 2009, 3,5 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés (DMA) ont été triés avec un objectif de 3,8 millions de tonnes d'ici à 2012, et 3,3 millions de tonnes de déchets non dangereux des entreprises (DNDE) ont été triés avec un objectif de 3,9 millions de tonnes d'ici à 2012 selon les objectifs du Grenelle de l'environnement.

Parallèlement, l'activité du tri DMA a représenté 2 236 emplois en 2008 avec un objectif 2012 de 2 538 emplois, et l'activité du tri DNDE a représenté 2 241 emplois en 2008 pour un objectif de 2 605 en 2012 selon les objectifs du Grenelle de l'environnement.

Le marché de construction de centres de tri OM en 2009 représente 18 M€, en baisse par rapport à 2007 [50].

Enjeux et impacts

Globalement, la diffusion des technologies de tri automatique reste encore faible au vu du parc actuel [3] mais leur utilisation au sein de centres de tri traitant des quantités importantes augmente de façon conséquente et la plupart des centres de tri qui se construisent aujourd'hui intègrent ce type de technologies, notamment les centres de tri haute performance [51].

Le développement de ces technologies représente un enjeu majeur vis-à-vis de la préservation des ressources en matières premières. L'efficacité du tri conditionne celle du recyclage.

En termes de réglementation, la directive-cadre européenne sur les déchets fixe des objectifs ambitieux aux États membres d'ici à 2020, notamment en termes de recyclage : 50 % des déchets ménagers et assimilés devront être recyclés ainsi que 70 % des déchets générés par les activités du BTP. Par ailleurs, une hiérarchie de la gestion

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

des déchets en cinq étapes a été établie afin d'en clarifier les applications [8].

En France, les objectifs nationaux fixés par le Grenelle de l'environnement visent à améliorer le taux de recyclage matière et organique à 35 % en 2015 et 45 % en 2020 et porter le taux de recyclage des déchets d'emballages ménagers et déchets banals des entreprises à 75 % en 2012 [49].

Le plan d'actions français 2009-2012, qui intervient dans le prolongement des travaux du Grenelle de l'environnement, s'inscrit pleinement dans les orientations de la directive européenne et doit permettre à la France d'être un des pays européens les plus avancés dans le domaine de la gestion des déchets [8].

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : BRGM
- **Industriels** : Équipements : Delta Neu, Galloo Plastics, Pellenc, Vauche... ; opérateurs de centres de tri : Coved, Onyx, Sita...
- **Pôles de compétitivité** : Team2 et Axelera

Principaux acteurs étrangers

- Binder+CO, Bollegraaf, LLA instruments, MDE...

Position de la France

La société PELLENC a un rayonnement international et reste en très en pointe vis-à-vis des technologies de tri et notamment la technologie de tri optique.

L'Ademe soutient l'investissement dans la recherche sur les technologies de tri ainsi que la modernisation du parc de centres de tri dans le cadre des objectifs du Grenelle. L'Ademe a ainsi lancé un appel à projet afin de développer les procédés de tri et de séparation, les systèmes de reconnaissance et d'identification et les dispositifs de séparation et d'extraction de la matière et des éléments indésirables concernant notamment le démantèlement d'équipements complexes multi-matériaux, les textiles, le mobilier hors d'usage et les métaux stratégiques.

La France est aujourd'hui en retard vis-à-vis de ses voisins allemands et anglais qui disposent de centres plus grands et plus automatisés. Cependant, la France est aujourd'hui en train de s'équiper notamment de centres de tri haute performance, qui devrait permettre la production de matières premières plus compétitives que ses voisins.

Analyse AFOM

Forces

Deux leaders mondiaux français de la récupération : Veolia Environnement et Suez Environnement.

Faiblesses

Une diffusion des technologies de tri et de valorisation des déchets encore faible.

Opportunités

Un élargissement des consignes de tri au niveau national, la raréfaction des ressources naturelles contribuant au développement des filières et plus largement un contexte réglementaire et politique favorable.

Menaces

Une rentabilité du secteur qui reste très dépendante du cours des matières premières et de la stabilité des conditions d'approvisionnement.

Recommandations

La réflexion sur le développement et la diffusion des technologies de tri automatique des déchets est bien sûr à mener dans une logique de filière (collecte, tri, traitement...). Développer les technologies de tri plus performantes n'a de sens que si l'ensemble de la chaîne est optimisé.

Il convient de souligner que le tri à la source des déchets, par les usagers eux-mêmes reste plus efficace, du moins si les pratiques évoluent en ce sens. Développer les actions d'information et d'éducation des usagers et des industriels sur le tri amont des déchets est donc probablement un levier intéressant. Dès lors, on peut imaginer que le tri aval soit à terme dédié au traitement de flux résiduels de déchets.

Liens avec d'autres technologies clés

31

37

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



39. Valorisation matière des déchets organiques

Description

On parle ici de déchets organiques au sens large, *i.e.* les boues de stations d'épuration (STEPs), les déchets d'origine marine, digestats [53] mais aussi la fraction fermentescible des déchets agricoles, ordures ménagères, bio-déchets, déchets des industries agroalimentaires, restauration, invendus des hypermarchés....

Deux types de valorisation de ces déchets sont envisageables :

- la valorisation énergétique, non appréhendée dans le cadre de cette fiche ;
- la valorisation matière : qui comprend épandage, compostage et recyclage industriel.

Les verrous concernent :

- l'amélioration de la qualité des boues de STEPs : le verrou porte sur leur teneur en métaux lourds et en polluants émergents. L'action peut être conduite soit en amont des stations, soit dans les stations elles-mêmes. Le type de pollution et son degré vont déterminer les voies de traitement possible ;
- le devenir de la fraction solide du digestat : la fraction solide des méthaniseurs est soumise aujourd'hui à des normes qui empêchent sa valorisation matière ;
- le développement de la technologie TBM (tri mécano-biologique) sur le gisement des ordures ménagères résiduelles : cette technologie associe fermentation puis séparation de la fraction organique à composter des autres matières présentes.

Tout ceci ne sera pas possible sans une action préventive menée en amont, et passant notamment par :

- l'amélioration de la collecte et du tri des déchets permettant d'augmenter leur taux de valorisation : la valorisation des gisements des gros producteurs constitue un enjeu majeur pour sa valorisation ;
- une augmentation des capacités de valorisation biologique de la fraction organique des déchets ménagers et assimilés.

Applications

L'objectif de la valorisation matière des déchets organiques est le retour au sol d'une matière organique de qualité, compatible avec les objectifs de préservation des milieux.

Épandage et incinération sont les voies de gestion des boues de STEPs les plus répandues actuellement. Mais certains acteurs de l'industrie agroalimentaire (exemple : Bonduelle) refusent désormais de travailler avec des agriculteurs qui épandent ces boues sur leurs cultures en raison de la qualité des boues.

1,8 million de tonnes de compost a été produit en 2006 à partir d'un gisement estimé à 5,2 millions de tonnes



de déchets. Il comprend des déchets verts, des boues d'épuration et la fraction organique des ordures ménagères résiduelles. (Source : Itom 2006).

En 2007, en France, sur les déchets collectés par le service public, seuls 14 % faisaient l'objet d'une gestion biologique, alors que la fraction organique des ordures ménagères résiduelles s'élève à 50 %.

Enjeux et impacts

Les objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement en matière de valorisation matière des déchets organiques imposent de doubler l'ici à 2015 les capacités de valorisation biologique de la fraction organique des déchets ménagers et assimilés.

Le plan d'actions, qui couvre la période 2009-2012 [8], fixe des objectifs quantifiés :

Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation



- réduire de 7 % la production de déchets ménagers et assimilés par habitant sur les cinq premières années ;
- diminuer de 15 % les quantités partant à l'incinération ou au stockage.

Pour atteindre ces objectifs, les enjeux sont d'ordre :

- technique : production de boues plus sûres, en plus petite quantité et de meilleure qualité (boues valorisables et « sans odeur ») ;
- économique : quel modèle économique de la valorisation matière de ces déchets organiques ? Le prix de la gestion des boues se répercute sur le prix de l'eau par exemple ;
- réglementaire : la fraction solide des méthaniseurs est soumise aujourd'hui à des normes qui empêche sa valorisation matière.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : Ademe, Agences de l'eau, Ifremer, Station biologique de Roscoff, Gepea, Inra (Nantes et Jouy-en-Josas), LRCCP
- Veolia Eau, Suez (Safège, Degrémont, Lyonnaise des eaux, Ondeo Industrial Solutions), Saur (Saur France, Coved, Stereau), Stereau...
- Pôles Eau, Mer Bretagne et Mer Paca, deux plateformes en Bretagne voulues par l'État, pôle Team

Principaux acteurs étrangers

- Remondis, Interseroh, Urbaser, Shanks...

Liens avec d'autres technologies clés

34

39

Position de la France

Les méthodes de traitement diffèrent sensiblement entre les états membres. En 2007 selon Eurostat, l'office statistique des communautés européennes, dans l'Union européenne des vingt-sept, 42 % des déchets municipaux traités ont été mis en décharge, 20 % incinérés, 22 % recyclés et 17 % compostés.

Les plus fortes proportions de déchets municipaux compostés l'ont été en Italie, en Autriche et aux Pays-Bas.

Analyse AFOM

Atouts

Actions des pouvoirs publics (politique des déchets 2009-2012).

Faiblesses

Développement insuffisant du compostage domestique, captage des gisements des gros producteurs insuffisant.

Menaces

Contexte normatif, dimension sociale (compostage domestique).

Recommandations

Aujourd'hui, le devenir de la fraction solide du digestat des méthaniseurs est complexe à cause des normes auxquelles elle est soumise : un travail d'influence pour modifier la norme serait bénéfique.

La collecte, le tri et la valorisation des déchets organiques sont étroitement liés à l'existence de débouchés. État, collectivités, représentants de l'agriculture et de la production alimentaire, associations environnementales et usagers ont tous un rôle à jouer pour favoriser les débouchés pour des composts de qualité.

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



40. Éco-conception

Définitions

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale permettant de quantifier les impacts d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie (de l'extraction des matières premières le composant jusqu'à son élimination).

Description

L'éco-conception n'est pas une technologie à proprement parler. Il s'agit plutôt d'un concept : tout produit ou service a un impact sur l'environnement, à une étape ou une autre de son cycle de vie. Ce peut être par l'intermédiaire de ses consommations énergétiques, de ses émissions ou des déchets qu'il génère.

L'éco-conception vise à réduire ces impacts, sans diminuer les qualités d'usage (durée de vie, réduction des coûts, des risques...) du produit ou du service. Elle tend même à les améliorer.

L'éco-conception concerne tous les secteurs applicatifs. Il n'y a pas une technologie proprement dite à définir. Chaque produit ou service nécessite son développement propre afin de trouver de nouveaux axes de conception améliorant les performances environnementales du produit. Les efforts de R&D à produire peuvent donc être conséquents.

Tous les types d'acteurs peuvent être concernés et proposer des produits aussi efficaces mais avec une empreinte environnementale réduite.

Dans les faits, cela se traduit par l'utilisation de matières plastiques dégradables, par un changement de réseau de distribution, une réduction des transports...

Par exemple, dans le secteur du bâtiment, la démarche consiste à réfléchir en amont à concevoir un bâtiment présentant de bonnes performances énergétiques, construit à partir de matériaux ne présentant pas d'impact néfaste sur la qualité de l'air intérieur (pas d'émission de formaldéhyde notamment), et dont la future déconstruction a été anticipée (séparation des matériaux aisée afin d'en faciliter le tri, valorisation possible sur site).

Le retour sur investissement n'est pas forcément très long pour une entreprise se lançant dans une démarche d'éco-conception. Mais le coût peut tout de même constituer un frein pour les PME-PMI.



Enjeux et impacts

Un certain nombre de normes et de rapports techniques existent aussi bien en France qu'à l'étranger. Les normes NF 14040 et 14044 sont par exemple relatives aux analyses de cycle de vie et la norme NF P 01 010 aux déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction.

Le plan d'action de l'Union européenne [61], adopté en juillet 2008 et relatif à la consommation, la production et la politique industrielle durables, vise à s'assurer que les produits en circulation sur le marché unique soient plus respectueux de l'environnement. L'éco-conception constitue la pièce maîtresse de ce plan d'action.

La Commission européenne mène une politique active de déploiement des achats publics durables dans ses États membres. Elle a notamment conduit une étude faisant l'état des lieux dans différents pays, identifiant les pays les plus avancés. Elle a notamment mis en ligne un outil (le *toolkit*) rassemblant un ensemble de fiches fournissant les critères environnementaux à utiliser dans les marchés publics [62].

Dans le cadre du Grenelle de l'environnement, la circulaire du 3 décembre 2008 sur l'exemplarité de l'État au regard du développement durable dans le fonctionnement de ses services et de ses établissements publics, instaure l'élaboration d'un plan « administration exemplaire » basé sur vingt actions communes dont une grande partie porte sur les achats durables.

Certaines entreprises trouvent dans la démarche un avantage concurrentiel, une dimension stratégique. En effet, un sondage Ifop réalisé en février 2010 sur les critères de choix des emballages dans l'agroalimentaire en France

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Un des outils utilisés en éco-conception est l'analyse du cycle de vie (ou ACV). Cette méthode est normalisée.

En plus d'une approche multi-étape, l'éco-conception se caractérise aussi par une approche multicritère : eau, air, sols, bruit, matières premières, énergie...

Applications

L'éco-conception s'inscrit dans des objectifs de faisabilité technique et économique, de qualité du service rendu, de maîtrise des coûts et de satisfaction client.

Elle s'applique à tous les secteurs y compris les services.

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

plaçait la notion d'impact environnemental en troisième position, derrière le prix et le caractère pratique, mais avant les critères de poids et d'esthétique.

Une étude a été réalisée conjointement par la chambre de commerce et de l'industrie de Saint-Etienne et l'Institut de développement de produits (IDP) à Montréal, en décembre 2008. Cette étude, portant sur 30 entreprises françaises et québécoises, a montré que l'éco-conception n'avait pas entraîné de détérioration de leur rentabilité et pour une nette majorité d'entre elles, la démarche a permis une augmentation de revenus. Mais il n'y a pas d'étude plus globale et l'analyse économique est souvent réalisée au cas par cas en matière d'éco-conception [64].

Acteurs

Principaux acteurs français

- Ademe, Cemef (Mines ParisTech) : proposition de formation continue en ACV ; Cetim, les CCI, cellule « Environmental Life cycle and Sustainable Assessment » (ELSA) : consortium entre École des mines d'Alès, Cirad, Cemagref, Agromontpellier, Inra
- **Bureaux d'étude** : 3A Consulting, A3i, Airele, ACV Conseil, Bureau Veritas, Cycleco, Enviro-Conseil, Enviro-Stratégies, Epure Éco-Innovation, Estia-Innovation, Gingko 21, OMEGA Incorporation, RDC Environnement, BG Ingénieurs Conseils SAS, BIO Intelligence Service...
- Association Edif (Energies Durables en Ile-de-France), Organics Cluster (Rhône-Alpes)
- Plateforme [Avnir] du CD2E, association pôle éco-conception, de nombreux pôles de compétitivité se penchent sur la question (projets, journées d'informations...) : Aerospace Valley, ASTech, Fibres, Axelera, pôle Pass, Maud, Dream Eau & Milieux (aspect technologies propres : matériaux biosourcés...) et la liste n'est pas exhaustive

Principaux acteurs étrangers

- 2-0 LCA consultants, 2B, Aalborg University, AQUA+TECH Specialities, BASF, Boustead Consulting, Sichuan University, University of Stuttgart

Position de la France

La France serait en retard par rapport notamment aux pays anglo-saxons. Mais dans les faits, les entreprises françaises se lançant dans l'éco-conception adoptent souvent une démarche plus forte que les sociétés anglo-saxonnes.

A travers les filières REP (responsabilité élargie du producteur), l'Etat français a introduit dans le cahier des charges des éco-organismes, le principe d'une modulation de l'éco-contribution en fonction notamment de la recyclabilité du produit concerné (les premières applications concernent certains équipements électriques et électroniques).

Analyse AFOM

Atouts

R&D, programmes nationaux.

Faiblesses

Retard par rapport à d'autres pays.

Opportunités

Prise de conscience écologique des consommateurs, marketing vert, diminution des ressources naturelles.

Menaces

Aucune.

Recommandations

Les recommandations pour la diffusion de ce concept touchent à la fois :

- la formation ;
- les services à développer ;
- et la veille qu'il convient de mener pour mesurer l'opportunité de s'engager dans cette démarche.

Le développement de cette approche relève de l'influence des acteurs publics, via notamment les marchés qu'ils gèrent, mais aussi des règles du marché. Les relations de type grands donneurs d'ordre-PME peuvent être un levier de diffusion si ces grands donneurs d'ordre imposent à leur sous-traitant d'adopter ce type de démarche.

Liens avec d'autres technologies clés

31

35

38

39

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

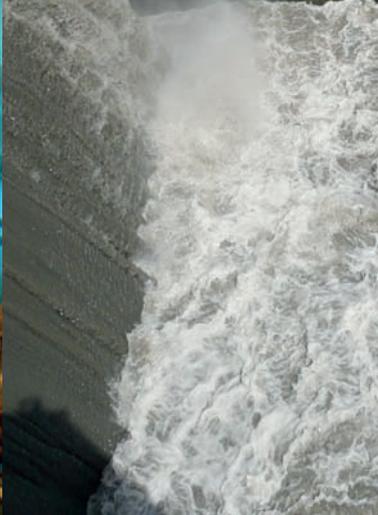
<input type="radio"/>	Faible
<input type="radio"/>	Moyen
<input checked="" type="radio"/>	Fort



BIBLIOGRAPHIE

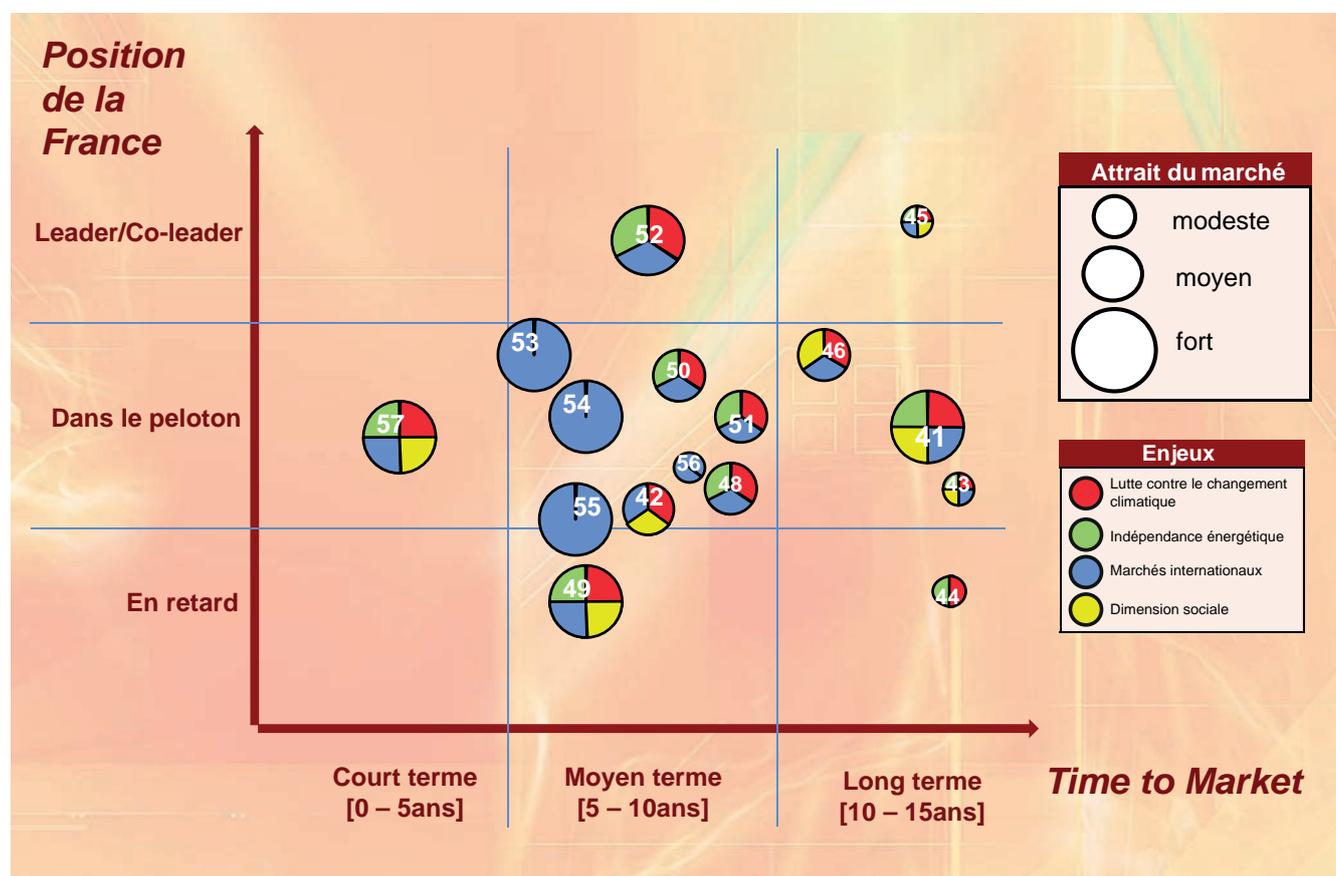
1. BCG, *Développer les éco-industries en France*, décembre 2008
2. CGDD, *L'environnement en France – Édition 2010*, 2010
3. CGDD, *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, mars 2010
4. Philippe Richert, *Qualité de l'air et changement climatique : un même défi, une même urgence*, 2007
5. Conseil d'analyse stratégique, *France 2025 : Diagnostic stratégique*, 2009
6. EPE Entreprises pour l'environnement, *L'eau à l'horizon 2025 : roadmap environnementale*, 2008
7. MEEDDM, *Stratégie nationale de développement durable 2010-2013*, 2010
8. MEEDDM, *Politique des déchets 2009-2012*, 2009
9. Olivia Montel-Dumont, *L'économie verte, Cahiers français n° 355*, mars-avril 2010
10. AAE, *Environnement en Europe, état des lieux et perspectives*, 2007
11. AAE, *Signaux de l'AAE 2009 thèmes environnementaux clés pour l'Europe*, 2009
12. AAE, *Stratégie de l'AAE 2009-2013*, 2009
13. Schneider G., *Le curage des sédiments des cours d'eau*, Le courrier de l'environnement de l'INRA
14. Levacher D., Colin D., Perroni A.C., Duan Z., Sun L., *Recyclage et valorisation de sédiments fins de dragage à usage de matériaux routiers*, IX^e Journées nationales génie civil-génie côtier, 12-14 septembre 2006, Brest
15. *Quand les écologistes critiquent la destruction des barrages*, <http://eau.apinc.org/spip.php?article172>
16. Semcha A., Thèse *Valorisation des sédiments de dragage : applications dans le BTP, cas du barrage de Fergoug*, Université de Reims Champagne-Ardenne, 11 décembre 2006
17. *Nouveau filon dans les mines : les bactéries*, Bulletin mensuel de ressources naturelles Canada (RNCAN) : éléments naturels, mai 2007 (dernière modification 26 mars 2010), n°14, <http://www.nrcan.gc.ca/com/elements/issues/14/bacter-fra.php>
18. *Worldwide exploration trends*, PDAC International Convention 2010, Metals Economics Group, 2010, [http://www.metalseconomics.com/pdf/WET%202010%20\(English\).pdf](http://www.metalseconomics.com/pdf/WET%202010%20(English).pdf)
19. Fondation de l'eau potable sûre (FEPS), *Exploitation minière et la pollution de l'eau*, <http://www.safewater.org/PDFS/resourceknowthefacts/exploitation+miniere+pollution+eau.pdf>
20. Morin D., *Les biotechnologies au service de la dépollution et de la protection de l'environnement*, Les enjeux des géosciences, novembre 2006, N°16
21. DGE, *Étude Technos clés 2010, fiche n° 11* : « Acquisition et traitement de données »
22. Pollutec Horizons : salon des solutions d'avenir au service des enjeux environnementaux et économiques, www.pollutec.com
23. Veolia Environnement, *Le dessalement de l'eau de mer, Le magazine de la chronique scientifique*, 2005, n°4
24. Bissonnette A., *Utilisation des nanomembranes pour le dessalement de l'eau et comparaison avec l'osmose inverse et la distillation*, Mémoire en vue de l'obtention du grade de maître en environnement, Université de Sherbrooke, 2008
25. Ambassade de Chine en France / ADIT, *La Chine étudie la possibilité de dessalement des glaces de mer*, BE Chine numéro 90, daté du 22 avril 2010, <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/63066.htm>
26. Corsin P., Mauguin G., *Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse : les vrais besoins en énergie*, L'eau, l'industrie, les nuisances, 2003, v. 262, pp25-29
27. Scheer S., Bas-Rabérin P., *Israël inaugure une grande usine de dessalement*, Reuters France, 16 mai 2010, <http://fr.reuters.com/article/companyNews/idFRLDE64F0ER20100516>
28. Site internet des pôles de compétitivité : Les actualités des pôles, <http://competitivite.gouv.fr/toutes-les-actualites-des-poles/actualite-du-pole-210/2010/28/dream-188/juin.html?cHash=70e5b27498e0d05713952e31afc6880e>
29. MEEDDM, *Les 12 mesures phares du PNSE2*, 12 janvier 2010 <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-12-mesures-phares-du-PNSE2.html>
30. Étude d'A. Feraudet (Sup'Biotech) sous la direction d'E. Trouvé (Véolia Eau) et D. Lando (Adebiotech), *Biotechnologies et eau : détection des polluants émergents dans l'eau – état des lieux*, Janvier 2009
31. Présentation Veolia Environnement, *Polluants émergents : solutions techniques de traitement*, 28 mars 2008
32. DGE, *Étude Technos clés 2010, Fiche n° 39* : « Mesure des polluants de l'eau prioritaires ou émergents »
33. *De la nécessité d'accroître la connaissance sur les polluants émergents*, Article actu-environnement, 22 octobre 2009, http://www.actu-environnement.com/ae/news/polluants-emergents_ineris_8652.php4
34. *Base de données Basol sur les sites pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif*, <http://basol.ecologie.gouv.fr/>

35. Laboudigue A., *Les technologies de dépollution : recherche, développement et méthodes d'évaluation*, Présentation au Congrès européen Eco-technologies pour le futur, Lille, 8 juin 2010
36. État de l'art réalisé par l'Adit pour le compte de l'Ademe, *Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation*, février 2006
37. Présentation de Le Gauffre P., *Projet national RERAU : Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissements urbains*, ENGEES/cemagref-ASTEE, 17 janvier 2006
38. Veolia Environnement, *La gestion de la qualité des ressources en eau*, Le magazine de la chronique scientifique, 2005, n°5
39. Eaufrance : portail d'entrée du Système d'information sur l'eau (SIE), <http://www.eaufrance.fr/index.php>
40. Site www.waterfootprint.org
41. Rapport Fédération professionnelle des entreprises de l'eau (FP2E) / BIPE, *Les services collectifs d'eau et d'assainissement en France : données économiques, sociales et environnementales*, 3^e édition, janvier 2008, http://www.lyonnaise-des-eaux.fr/resources/pdf/12041894031_Rapport_BIPEFP2E_2008_BAT_vf.pdf
42. Hocquard C., *Ressources minérales, nouvelles frontières*, BRGM, Ecole thématique CNRS-INSU, Nancy, 3-5 Février 2010
43. Casalegno E., *Des nanominéraux tirés des déchets, la science et les technologies russes au jour le jour*, Intelink Press (Intelligence et système de veille stratégique), 22 avril 2010, http://www.intelink.info/actualites/sciences/1004221907_la_sciences_et_les_technologies_russes_au_jour_le_jour
44. Denzler L., *Les déchets électroniques, source de matières premières*, 23^e apéro scientifique de l'EMPA, Dübendorf/St-Gall/Thoune, mai 2005
45. Burns S., *Recycling of Rare Earth Metals faces challenges*, MetalMiner (Sourcing and trading intelligence for global metals markets), 16 juin 2009, <http://agmetminer.com/2009/07/16/recycling-of-rare-earth-metals-faces-challenges/>
46. Macqueron G., *Des terres rares en abondance pour les technologies vertes ?*, Futura-Sciences, 18 décembre 2009
47. Union européenne, *List of 14 critical mineral raw materials*, Memo/10/263, 17 juin 2010
48. Ambassade de France au Japon / ADIT, *Politique japonaise d'approvisionnement en métaux rares*, BE Japon numéro 538, daté du 14 mai 2010, <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/63354.htm>
49. Ademe, *Les chiffres clés des déchets*, 2009
50. Ademe, *Marchés et emplois des activités liées aux déchets en France : quel impact du Grenelle ?*, Ademe&Vous, Stratégies et études n° 25, 9 juillet 2010
51. Appel à projets Éco-industries 2010 / Axe 3 : Transformer vers des matières premières secondaires. Les priorités de l'Ademe en termes de Recherche et Développement sur les technologies de tri et recyclage.
52. Ademe, *Le marché des activités liées aux déchets*, Synthèse, Mars 2007
53. Site http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/digestats_valorisation.html
54. Total, *Les plastiques*, dossier « Pour comprendre les énergies » [planete-energies.com](http://www.planete-energies.com), <http://www.planete-energies.com/contenu/dossier/plastiques/recyclage.html>
55. Éco-emballages, *Le recyclage des emballages plastiques*, <http://www.ecoemballages.fr/le-tri-des-emballages/du-recyclage-au-recycle/plastique/>
56. Lagadec C., *La mise en œuvre d'une directive européenne : exemple de la directive-cadre sur l'eau dans le bassin Loire-Bretagne à travers le regard d'une association de protection de l'environnement : eau et rivières de Bretagne*, Mémoire de stage pour l'obtention du master aménagement et gestion intégrée des ressources environnementales (Agire), 2007
57. Héraud B., *Encore des obstacles pour la valorisation des algues vertes*, interview de Jean-François Sassi du Centre d'étude et de valorisation des algues (Ceva), Novethic, 01 septembre 2009
58. Boudehane K., *La Chine accroît sa capacité de recyclage du plastique*, Plastiques et Caoutchouc Magazine, 25 août 2009, <http://plastiques-caoutchoucs.com/La-Chine-accroit-sa-capacite-de-856.html>
59. Boeglin N.n Veuillet D., *Introduction à l'analyse du cycle de vie (ACV)*, Note de synthèse externe, Ademe, mai 2005
60. Agence régionale de de l'environnement de Haute-Normandie (ARHEN), *Dossier « on déballe tout sur les emballages »*, avril 2009, <http://www.arehn.asso.fr/dossiers/emballages/emballages.html>
61. Unité politique industrielle durable, Direction générale des entreprises et de l'industrie, *L'éco-conception pour un avenir durable*, magazine en ligne *Entreprises et industrie* de la Commission européenne, 19 novembre 2009, http://ec.europa.eu/entreprise/e_i/news/article_9741_fr.htm
62. Commission européenne, *Toolkit : mallette de formation aux PME* de la Commission européenne, http://ec.europa.eu/environment/gpp/toolkit_en.htm
63. Ademe, *Management environnemental et éco-produits*, <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=1&cid=96&m=3&catid=12913>
64. Chambre de commerce-industrie et services de Saint-Etienne/Montbrisson et Institut de développement de produits (IDP), *L'écoconception : quels retours économiques pour l'entreprise ?*, Collaboration pôle d'écoconception et management de cycle de vie Décembre 2008
65. Mutations économiques dans le domaine de la chimie, Étude Pipame, février 2010



Énergie

41. Carburants de synthèse issus de la biomasse
42. Solaire thermodynamique
43. Énergies marines
44. Piles à combustible
45. Technologies de l'hydrogène
46. Captage, stockage et valorisation du CO₂
47. Énergie nucléaire*
48. Solaire photovoltaïque
49. Énergie éolienne en mer
50. Géothermie
51. Stockage stationnaire d'électricité
52. Réseaux électriques intelligents
53. Technologies d'exploration et de production d'hydrocarbures
54. Technologies de raffinage des hydrocarbures
55. Technologies pour l'exploration, l'extraction et les traitements des ressources minérales
56. Carburants de synthèse issus de ressources fossiles
57. Biomasse et déchets : valorisation énergétique



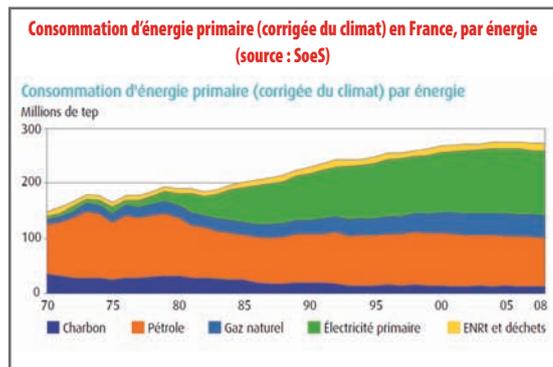
(*) Considérant les caractéristiques en termes d'accès au marché qui peut être très court, dans le cas de la maintenance par exemple ou très long terme pour les aspects technologiques, le type de graphique ci-dessus n'est pas adapté à la représentation de la technologie clé « Énergie nucléaire ».

Contexte et enjeux

Le bilan énergétique national

La France était en 2007 le huitième plus grand consommateur d'énergie au monde, derrière les États-Unis (premier consommateur mondial), la Chine, la Russie, l'Inde, le Japon, l'Allemagne et le Canada. Avec 4,15 tep consommées par habitant et par an, elle se situe légèrement en dessous de la moyenne des pays de l'OCDE, soit 4,64 tep en 2007.

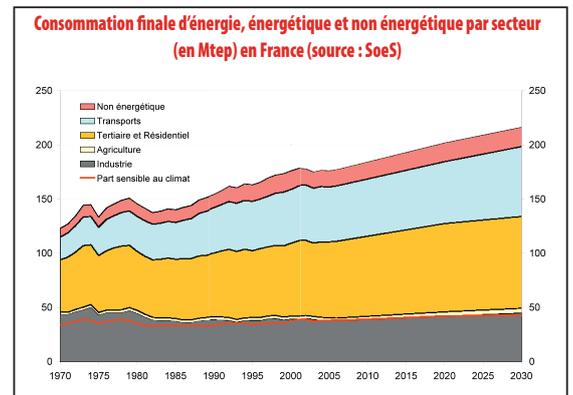
La consommation d'énergie primaire en France s'est élevée à 274 Mtep en 2008. Trois énergies dominent largement ce bilan : l'électricité (43 %), le pétrole (32 %) et le gaz naturel (15 %). Si la composition de ce « mix énergétique » a fortement évolué depuis les années soixante-dix, avec notamment la part importante prise par l'électricité d'origine nucléaire, elle a eu tendance à se stabiliser durant les années 2000. La consommation de pétrole, quant à elle, a eu tendance à se concentrer dans le secteur des transports.



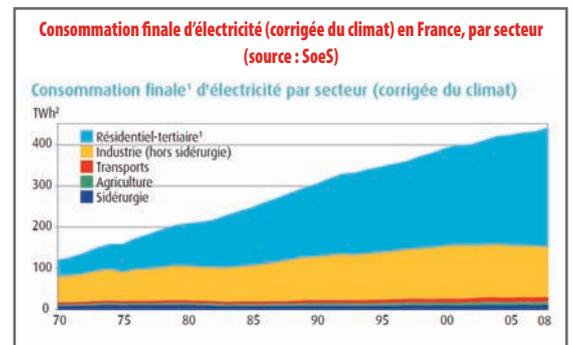
Selon les projections établies par la DGEC dans le scénario énergétique de référence publié en 2008, la croissance de la consommation d'énergie primaire serait de + 0,7 % par an d'ici à 2030, avec un léger ralentissement sur la dernière décennie (+ 0,6 % en moyenne). On note en particulier une forte croissance des énergies renouvelables, à la fois sous forme d'électricité (+ 2,5 % par an en moyenne) et de chaleur (+ 1,9 % par an), celles-ci ne représentant toutefois qu'une part mineure par rapport à l'électricité d'origine nucléaire, au pétrole et au gaz naturel ; l'évolution la plus notable concernerait le gaz naturel, dont la consommation, tirée par la production d'électricité, augmenterait au rythme de + 2,3 % par an.

Les évolutions sectorielles

Depuis 1973, la part relative de l'industrie dans la consommation d'énergie au niveau national a fortement diminué (de 36 % à 23 %, hors branche énergie), alors que celle du secteur résidentiel-tertiaire s'est stabilisée et que celle des transports a connu une croissance significative (de 19 % à 31 %). À l'horizon 2030, la consommation d'énergie dans l'industrie devrait peu évoluer, sa part relative continuant donc à baisser.



Cette période a par ailleurs été marquée par une forte progression de la consommation d'électricité, qui a crû deux fois plus vite que la consommation globale d'énergie, résultat, pour l'essentiel, de la substitution massive du fioul par l'énergie nucléaire pour la production d'électricité. Le secteur résidentiel-tertiaire représente désormais à lui seul les deux tiers de la consommation finale d'électricité, contre 30 % pour l'industrie (y compris la sidérurgie), une part relative qui tend par ailleurs à décroître.



Les tendances au niveau mondial

Selon le scénario tendanciel de l'AIE, les besoins en énergie au niveau mondial pourraient croître de 84 % entre 2007 et 2050. En Chine, la consommation d'énergie pourrait doubler d'ici à 2030 ; toutes les sources d'énergie seraient concernées, le charbon restant toutefois dominant, avec comme conséquence un doublement des émissions de CO₂ (pour lesquelles la Chine occupait déjà en 2007 la première place, devant les États-Unis). Toujours selon ce scénario, les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) représenteraient encore plus de 85 % de la fourniture d'énergie primaire au niveau mondial. De fait, si une stabilisation, voire une diminution des besoins en hydrocarbures des pays de l'OCDE est envisageable à court terme, ce ne saurait être le cas des pays en voie de développement.

Une des conséquences est que les préoccupations géopolitiques relatives aux marchés du pétrole et du gaz naturel sont appelées à jouer durablement un rôle clé en matière d'énergie. En effet, plus des deux tiers des réserves mondiales de pétrole conventionnel sont concentrés au Moyen-Orient, dont un quart en Arabie Saoudite. Les réserves de gaz naturel sont

elles-mêmes relativement concentrées : ainsi, la Communauté des États indépendants en détient environ un tiers. Au total, l'Opep et la Russie détiennent les trois quarts des réserves de pétrole, et trois quarts des réserves de gaz. La conséquence est qu'à long terme, l'économie mondiale est appelée à dépendre d'un nombre restreint de pays producteurs d'hydrocarbures, dans un contexte où la marge de manoeuvre des pays de l'Opep au niveau des moyens de production est limitée et où les capacités de raffinage sont sous tension. Dans cette situation tendue, tout aléa climatique ou géopolitique se traduit immédiatement par une flambée des prix.

Les ressources en hydrocarbures

La question du « pic pétrolier mondial » (« peak oil »), qui fait référence à la date à laquelle la production mondiale de pétrole atteindra son maximum puis commencera à décliner du fait de l'épuisement des réserves, fait l'objet de débats réguliers, les avis divergeant fortement à ce sujet.

Ce pic dépendra à la fois de l'évolution de la production et de la consommation (on introduit ainsi également la notion de « pic de la demande »). Le bilan des réserves prouvées pour les principales sources d'énergie, qui équivalent à 40 années de production pour le pétrole conventionnel, 70 années par le gaz naturel et l'uranium (utilisé selon les méthodes actuelles, hors réacteurs de quatrième génération qui multiplieront cette ressource de deux ordres de grandeur) et 170 années pour le charbon, montre qu'il n'y a pas de risque de pénurie à court terme, même pour les hydrocarbures. Des investissements massifs restent toutefois nécessaires : ainsi, selon l'AIE, près de la moitié de la capacité de production mondiale de gaz naturel devra être remplacée d'ici à 2030 en raison de l'épuisement des gisements. Il s'agit toutefois de perspectives à moyen-long terme ; dans l'immédiat, la récession économique qui a débuté en 2008 devrait avoir comme conséquence une diminution de la consommation énergétique en 2009, avec comme corollaire un tassement conjoncturel du cours des hydrocarbures.

Dans le cas du pétrole, trois leviers principaux devraient permettre de maintenir dans les prochaines années la production à un niveau suffisant :

- tout d'abord, le maintien des investissements dans l'amont pétrolier ; il faut toutefois noter que le rythme de découverte de nouveaux gisements s'est ralenti et que leur taille moyenne a diminué, ce qui implique que les investissements en exploration et pour la mise en production sont plus longs à amortir ;
- ensuite, une exploitation plus efficace des gisements existants : en moyenne, seulement un tiers du pétrole d'un gisement est récupéré ; l'amélioration de ce taux de récupération, par exemple grâce à la mise en oeuvre nouveaux procédés, permettra de repousser l'échéance d'épuisement de ces gisements ;
- enfin, l'exploitation de ressources non conventionnelles ; un des exemples les plus connus est celui des sables bitumineux de la province d'Alberta, au Canada ; le coût environnemental de cette exploitation est toutefois élevé et devra être incorporé dans la chaîne de valeur : déforestation, consommation de gran-

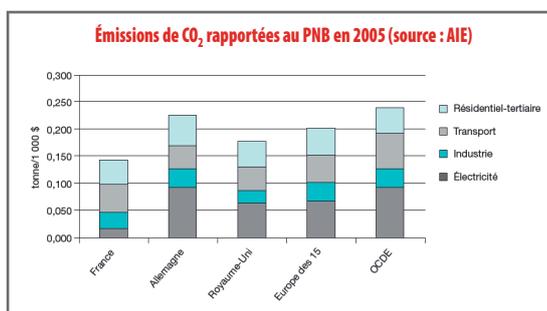
des quantités d'eau, rejets liquides (eaux usées) et gazeux (composés soufrés, en particulier)...

Par ailleurs, il faut souligner que les ressources pétrolières hors Opep sont en voie d'épuisement, ce qui implique une dépendance de plus en plus marquée vis-à-vis des pays de l'Opep, alors que certains de ceux-ci peuvent éprouver des difficultés (voire des réticences) à augmenter leurs capacités de production. Pour l'ensemble de ces raisons, les prix vont très probablement rester structurellement orientés à la hausse.

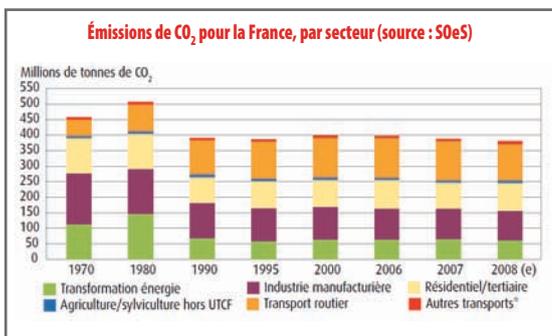
Le changement climatique

En matière de scénarios sur le changement climatique, il est devenu usuel d'utiliser l'échéance de 2050 comme point de repère. Deux scénarios, en particulier, encadrent les « avenir possibles » : le premier caractérisé par un objectif « raisonnable », revenir en 2050 au niveau d'émission actuel ; le second, caractérisé par un objectif ambitieux, diviser par deux les émissions mondiales par rapport au niveau actuel (voir à ce sujet le rapport de la commission énergie du Centre d'analyse stratégique, ainsi que le scénario « Blue Map » de l'AIE, évoqué ci-après). Ce dernier objectif est à différencier selon le stade de développement du pays considéré : pour les pays les plus industrialisés, il s'agit de diviser par quatre les émissions de GES d'ici à 2050. C'est cet objectif qui est rappelé à l'article 2 de la loi de programme de 2005 fixant les orientations de la politique énergétique.

À ce stade, il est utile de rappeler que les émissions de CO₂ de la France, rapportées aux différents secteurs émetteurs, possèdent une structure relativement atypique. Cela résulte principalement du fait que la production d'électricité repose pour l'essentiel sur des énergies très faiblement émettrices : nucléaire et, dans une moindre mesure, hydraulique. En revanche, on constate que les niveaux d'émission des autres secteurs (résidentiel-tertiaire, transport et industrie) sont, toutes proportions gardées, comparables à ceux des autres pays développés.



Dans le détail, on constate que ce sont les émissions issues du secteur des transports qui ont connu la plus forte progression en l'espace de quelques décennies – devenant ainsi le premier secteur émetteur – alors que celles issues du secteur résidentiel-tertiaire progressent à un rythme nettement plus lent depuis les années 1990, et que celles issues de l'industrie sont en décroissance régulière.



Au niveau international, les questions relatives au changement climatique et aux émissions de GES font l'objet d'un traité international connu sous le nom de protocole de Kyoto. Négocié à partir de 1997, celui-ci arrive à échéance en 2012, et la préparation de « l'après-Kyoto » a déjà démarré. Les négociations s'avèrent toutefois délicates : ainsi, la 15^e Conférence des parties (COP) qui s'est tenue à Copenhague fin 2009 n'a pas permis d'aboutir à un consensus sur des objectifs chiffrés de réduction des émissions de GES. Les parties prenantes se sont engagées à contenir le réchauffement climatique sous la barre des 2°C ; chaque pays développé doit durant l'année 2010 fixer ses propres objectifs de réduction des émissions ; de son côté, la Chine a pour la première fois pris des engagements en termes de réduction de l'intensité énergétique. On peut toutefois noter que le texte signé n'est pas juridiquement contraignant, ce qui limite sa portée. La conférence de Cancun fin 2010 a préparé la conférence de Johannesburg pour l'après Kyoto et donné quelques avancées : l'accord de Copenhague est intégré à la Convention sur le climat, un fonds vert pour le climat est créé ainsi qu'un centre de technologie pour le climat. Le mécanisme de lutte contre la déforestation est lancé. Au-delà des incertitudes scientifiques qui peuvent subsister quant aux causes et conséquences du réchauffement climatique et de la nécessaire prise en compte de la situation économique propre à chaque pays (faut-il fixer des objectifs chiffrés contraignants aux pays les moins développés ?), le manque de solutions technologiques simples et à un coût abordable constitue un frein majeur à l'établissement d'un large consensus.

Les contraintes temporelles

Lorsqu'on analyse de façon rétrospective les évolutions qu'a pu connaître le secteur de l'énergie, un constat s'impose : les évolutions sont lentes, « les transitions d'un système technologique à un autre s'opèrent sur des dizaines d'année ». De fait, toute réflexion prospective en matière d'énergie doit prendre en compte la relative lenteur de réaction face aux enjeux auxquels ce secteur est confronté : en particulier, les horizons temporels considérés sont en moyenne sensiblement plus éloignés que dans la plupart des secteurs.

Les débats autour de l'acceptabilité

Historiquement, la question de l'acceptabilité a avant tout été



associée à la filière nucléaire, les débats portant en particulier sur la gestion des déchets qui en sont issus. Mais plusieurs exemples récents, comme les polémiques autour des biocarburants et de leur impact négatif sur les usages alimentaires des ressources agricoles, ou bien les réactions de rejet que peuvent susciter les projets d'implantation d'éoliennes, montrent que cette dimension doit désormais faire l'objet d'une analyse dans le cas de toute filière émergente.

De plus, cette analyse doit tenir compte des contextes locaux : le choix des sites d'implantation, que ce soit pour des opérations de démonstration ou pour des projets industriels, n'est pas neutre. Au-delà des questions particulières soulevées dans le cas de telle ou telle technologie, l'expérience montre que les débats portent de façon récurrente sur les aspects suivants :

- les questions relatives à la sécurité et aux impacts colatéraux, qu'elles soient liées à des risques industriels plus ou moins bien identifiés (fiabilité des éoliennes terrestres, par exemple) ou qu'elles relèvent d'une application éventuelle du principe de précaution (impacts potentiels de l'éolien offshore sur les écosystèmes marins, par exemple) ; dans le premier cas, la réponse est à chercher du côté de la réglementation, des normes, de la certification... ; dans le second cas, des travaux scientifiques à caractère plus fondamental peuvent s'avérer nécessaires ;
- l'impact sur le cadre de vie et les risques de dévalorisation du patrimoine, qui peuvent se traduire par un préjudice économique, éventuellement quantifiable ;
- la nécessaire évolution des modes de vie, résultat, en particulier, de nouvelles incitations et contraintes au niveau des usages finaux de l'énergie (bâtiment, transports...).

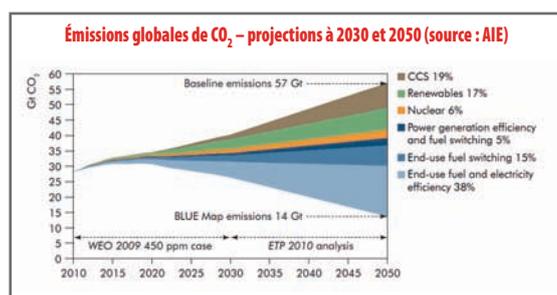
Dans tous les cas, il s'avère nécessaire d'associer les citoyens en amont des réflexions – on peut rappeler à ce sujet que le principe de participation fait partie des principes fondamentaux du droit de l'environnement. La tenue de débats publics précédant un projet sur un site donné peut se révéler insuffisante : les choix effectués doivent être suffisamment expliqués, un des enjeux étant de démontrer que ceux-ci relèvent d'une vision à long terme et non d'un quelconque effet d'aubaine (exemple des débats autour de la multiplication des projets dans le domaine de l'éolien ou du photovoltaïque).

Les grandes tendances d'évolution du secteur

La réponse au changement climatique

Les voies possibles pour lutter contre le changement climatique se répartissent schématiquement en deux catégories : produire de l'énergie en ayant recours à des technologies plus « propres » ; utiliser l'énergie de façon plus rationnelle.

Les scénarios établis dans le cadre de l'AIE permettent d'avoir une vision plus précise des contributions potentielles de chacune des grandes familles technologiques.



Le scénario « Blue Map » est le scénario optimiste, dans lequel les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie sont réduites de moitié d'ici à 2050, par rapport à leur niveau de 2005. Selon ces projections, et en comparaison avec les évolutions tendanciennes, plus de la moitié (53 %) de la différence observée provient de l'efficacité énergétique (au niveau des usages finaux) ainsi que des changements de combustible. Les deux autres principales contributions proviennent ensuite du captage et du stockage du CO₂ et des énergies renouvelables.

La réduction des émissions résultant de la production d'énergie concerne au premier chef la production d'électricité. En effet, celle-ci représente à elle seule 32 % de la consommation mondiale de combustibles fossiles, et 41 % des émissions de CO₂ du secteur de l'énergie. Depuis 1990, la part du charbon dans la production d'électricité est passée de 37 % à 42 % en 2007 pour le

charbon, et de 15 % à 21 % pour le gaz naturel. Selon l'AIE, sur la base des évolutions tendanciennes, ces parts pourraient passer respectivement à 44 % et 23 % en 2050.

La maîtrise des émissions de GES impliquera une évolution profonde de la structure du « mix énergétique » de chaque pays, l'objectif étant de tendre vers un mix autant que possible « décarboné ».

Au niveau de la production d'énergie, plusieurs options sont envisageables :

- développer la part des énergies renouvelables. Dans le contexte européen, le cadre en est principalement défini par la directive relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, dont la dernière version a été publiée en 2009 (directive 2009/28/CE). L'objectif fixé pour la France est que cette part représente 23 % de la consommation d'énergie finale d'ici à 2020 (contre 10 % en 2005, principalement sous forme d'électricité hydraulique et de bois-énergie) ;
- augmenter les capacités de stockage d'électricité et de chaleur. En effet, le caractère fluctuant et intermittent des énergies renouvelables, ainsi que le coût de modulation des centrales nucléaires, imposent de renforcer la maîtrise des flux énergétiques entre l'offre et la demande d'électricité. La mise en oeuvre d'installations de stockage flexibles et performantes apparaît comme un élément de réponse essentiel à cette problématique ;
- conforter la place du nucléaire. S'agissant de la production d'électricité en base, le nucléaire, le gaz naturel et le charbon sont en concurrence, ce dernier étant dominant au niveau mondial. En l'absence de captage et de stockage du CO₂ à un coût acceptable, la production d'électricité à partir de charbon et, dans une moindre mesure, de gaz naturel, restera handicapée par son impact du point de vue des émissions de GES, alors que la production d'origine nucléaire peut dès à présent contribuer significativement à la réduction de ces émissions. Par ailleurs, cette filière présente comme avantage de produire un kWh avec un prix relativement stable, du fait que la part du coût du combustible dans le coût de production est très faible : même une forte augmentation du prix de l'uranium n'aurait qu'un impact très limité ;

• réduire les émissions de CO₂ issues de la combustion d'énergies fossiles, en particulier pour la production d'électricité. Si le charbon est devenu marginal dans le mix énergétique français, ce n'est pas vrai au niveau mondial : 37 % de la production d'électricité repose sur le charbon, contre environ 4 % en France. Les réserves de charbon étant abondantes et relativement bien réparties au niveau mondial, celui-ci continuera à jouer un rôle de premier plan jusqu'en 2050 et au-delà.

Il faut néanmoins rappeler que, comme l'a rappelé la directive européenne de 2009, un levier essentiel, à court terme, pour réduire les émissions de GES, est l'amélioration de l'efficacité énergétique au niveau de l'utilisation finale dans les différents secteurs concernés : bâtiment, transports et industrie. À ce sujet, le renforcement des réglementations et l'augmentation du prix de l'énergie ont encouragé la mise au point de technologies permettant de maîtriser la consommation énergétique : on peut citer les réglementations thermiques

successives, qui ont permis de diminuer progressivement les besoins en chauffage des bâtiments neufs, ou la diminution régulière de la consommation moyenne des véhicules particuliers. Mais l'amélioration de ces performances a été au moins en partie contrebalancée par des dépenses énergétiques supplémentaires (effet rebond) : augmentation de la taille moyenne des logements, généralisation de l'équipement en électroménager et multiplication des produits « bruns », développement de la climatisation, augmentation du taux d'équipement en voiture des ménages et des distances parcourues...

La transformation des marchés de l'électricité

Le modèle du réseau électrique national, également dénommé « réseau d'alimentation générale », reposait pour l'essentiel sur des centrales de grande taille assurant la production en « base », complétée par des moyens de production en « pointe », avec un opérateur unique pour le transport et la distribution. Dans ce modèle, la production d'électricité dite « décentralisée » n'occupait qu'une place modeste. Ce modèle est appelé à évoluer, en raison de plusieurs facteurs : tout d'abord, l'ouverture des marchés de l'électricité a permis l'apparition de quelques nouveaux acteurs au niveau national, l'objectif ultime restant toutefois la constitution d'un marché électrique européen réellement ouvert, ce qui suppose une fluidité des échanges entre pays ; par ailleurs, la production issue de sources renouvelables monte en puissance, leur caractère intermittent les différencie notablement des moyens de production conventionnels, ce qui implique une évolution du cadre réglementaire et des investissements éventuels dans certaines technologies, notamment le stockage.

Les activités de service

Les activités de service liées aux différentes filières énergétiques sont multiples : bureaux d'étude et d'ingénierie, montage de projet, financement, négoce, exploitation et maintenance, diagnostic et expertise, conseils juridiques... Il s'agit d'un secteur hétérogène, dans lequel coexistent grands acteurs plus ou moins intégrés, PME, artisans et indépendants...

Pour l'essentiel, ce sont des activités qui se sont développées de longue date. Elles jouent un rôle essentiel dans le secteur de l'énergie, au même titre que la fabrication d'équipements ou la fourniture d'énergie proprement dite : cette dernière, qu'elle soit sous forme de combustible, de chaleur ou d'électricité, est fondamentalement perçue comme une « commodité », le client final ayant avant tout besoin qu'on lui fournisse un service énergétique plutôt que des kWh.

Les évolutions actuelles ne devraient toutefois pas se traduire par des ruptures du point de vue des métiers. La tendance est plutôt à l'intégration de nouvelles compétences dans le cadre des métiers « traditionnels » : par exemple, l'exploitation d'une chaufferie au bois demande des compétences spécifiques, en comparaison avec les chaufferies conventionnelles alimentées au gaz ou au fioul.

Dans ce contexte, de nouveaux métiers peuvent apparaître (exemple de l'activité d'« agrégateur » en réponse aux besoins d'équilibrage du réseau et de maîtrise de la pointe électrique), mais il s'agit là d'une tendance mineure. Globalement, deux grandes tendances marquent les évolutions des services énergétique :

- la professionnalisation et les besoins de formation en vue de l'acquisition de compétences nouvelles ;
- la généralisation des approches orientées « demande » (exemple des contrats de performance énergétique), centrées sur les besoins du client final.

Les tendances technologiques et les technologies clés

Dans le domaine de l'énergie, à court-moyen terme, les tendances technologiques sont marquées par une « succession de progrès évolutifs offerts par un bouquet technologique très diversifié » plutôt que des ruptures (source : Centre d'analyse stratégique).

Il est vrai qu'en matière d'énergie, les véritables ruptures technologiques, au sens de l'apparition d'innovations technologiques se développant rapidement et modifiant en profondeur le secteur, sont rares. Ces trente dernières années ont toutefois été marquées par plusieurs innovations « majeures », telles que l'introduction des turbines à gaz, en particulier en cycle combiné, ce moyen de production s'étant peu à peu imposé comme la référence en matière de production d'électricité, ou bien la généralisation de technologies telles que la sismique 3D ou le forage dirigé, qui ont marqué l'exploration-production d'hydrocarbures.

Les principales tendances technologiques sont présentées ci-après par grandes filières.

Les énergies renouvelables : hydraulique, énergies marines, biomasse, énergie du vent, énergie solaire

La directive européenne relative à la production d'énergie à partir de sources renouvelables joue un rôle moteur dans le développement des filières basées sur des énergies renouvelables ; cela recouvre toutefois des réalités et des potentialités très diverses :

- le potentiel hydroélectrique des pays développés est d'ores et déjà largement exploité, et la marge de manoeuvre est limitée ; inversement, le potentiel énergétique des mers est significatif, notamment en France, mais il est dispersé et aucune technologie ne permet encore à ce jour de l'exploiter de façon fiable, efficace et rentable bien que plusieurs voies soient explorées. La filière des hydroliennes pourrait atteindre une maturité



suffisante à court-moyen terme et porte sur des puissances faibles ; en revanche, les technologies de conversion de l'énergie thermique des mers ou de l'énergie de la houle, intensives en capital, s'inscrivent dans une perspective à moyen-long terme ;

- la biomasse occupe une place significative dans le bilan énergétique français actuel, principalement en combustion pour la production de chaleur. D'autres modes de valorisation pourraient permettre de mieux exploiter le potentiel français, tels que la méthanisation pour la production de biogaz ; quant aux biocarburants, si la première génération (production à partir de plantes sucrières, de céréales ou d'oléagineux) atteint ses limites (concurrence avec les usages alimentaires, en particulier), la deuxième génération, produite à partir de ressources lignocellulosiques (donc à vocation non alimentaire), pourrait prendre le relais, une fois que les procédés de conversion seront suffisamment maîtrisés. À plus long terme, une troisième génération pourrait voir le jour, qui reposerait sur l'exploitation de la biomasse marine (microalgues, en particulier) ; de nombreux verrous restent toutefois à lever : procédés de culture et de récolte, extraction à coût réduit... ;

- l'éolien terrestre a aujourd'hui atteint une certaine maturité, même si le caractère intermittent de la production rend délicate son intégration dans les réseaux électriques ; de fait, les améliorations techniques sont essentiellement incrémentales. En revanche, l'éolien offshore n'a fait son apparition que récemment (premier champ de 500 MW en 2003 au Danemark), et les obstacles techniques sont multiples : tenue des équipements en environnement sévère (milieu salin, intempéries) et raccordement au réseau électrique en particulier ;

- dans le domaine du solaire, deux technologies ont atteint un certain degré de maturité : les capteurs thermiques pour la production d'eau chaude, et les panneaux photovoltaïques à base

de silicium pour la production d'électricité ; en France, ces produits se sont principalement diffusés dans l'habitat. Les nouvelles générations de cellules photovoltaïques sont basées sur l'utilisation de matériaux inorganiques semi-conducteurs en couches minces ; des cellules basées sur des matériaux organiques pourraient aussi voir le jour.

Les énergies fossiles

Dans le cas du pétrole, deux enjeux constituent les principaux moteurs des évolutions technologiques :

- le renouvellement des ressources, destiné à repousser la date du « pic de production » : c'est ce qui motive, par exemple, l'amélioration du taux de récupération dans les gisements déjà exploités, la production en offshore très profond, l'exploitation des réserves d'huiles extra-lourdes, ou bien encore de ressources non conventionnelles telles que les schistes bitumeux ;

- la maîtrise de la qualité des produits pétroliers, en réponse au renforcement des normes environnementales, en particulier dans le secteur des transports : il s'agit à la fois de valoriser de façon optimale (sous forme de carburants ou de bases pétrochimiques) chaque baril, tout en faisant face au recours croissant à des ressources non conventionnelles, qui nécessitent des technologies de conversion spécifiques ;

- la question de l'exploitation de ressources non conventionnelles se pose aussi dans le cas du gaz naturel : un exemple est celui du gaz issu de roches indurées, des gisements caractérisés par une faible perméabilité de la roche, ce qui freine la circulation du gaz et nécessite donc une fracturation intense pour permettre la production, et dont l'exploitation se développe en particulier aux États-Unis.

En aval, une partie des efforts se concentrent sur les technologies qui permettent de capter les émissions de CO₂ issues de la combustion de combustibles fossiles, en particulier du charbon. Certaines d'entre elles seront susceptibles d'équiper des centrales existantes ; d'autres, comme l'oxy-combustion, correspondent à des conceptions nouvelles. On peut par ailleurs noter que le captage du CO₂ sera probablement maîtrisé dans un horizon relativement proche, la question des coûts restant ouverte.

L'énergie nucléaire

Les prochaines années seront marquées par la mise en service de centrales de nouvelle génération, dite génération III. Parmi ces réacteurs, on peut citer l'EPR (« European Pressurized Reactor »), en cours de construction sur deux sites en Europe (France et Finlande et un en Chine), opérations les plus avancées. L'Atméa-1 est un autre exemple de réacteur en cours de développement par Areva, de plus faible puissance que l'EPR. Les réacteurs de troisième génération présentent des évolutions importantes en termes de sûreté, intégrant l'historique des risques potentiels et les techniques les plus récentes. La quatrième génération constitue quant à elle une rupture technologique avec un horizon à long terme (2040). Les réacteurs de génération IV sont des réacteurs à neutrons rapides qui peuvent ainsi tirer un potentiel énergétique de la totalité de l'uranium combustible, contre moins de 1% pour les réacteurs à neutrons lents de deuxième et troisième génération.

Cette génération future fait l'objet d'une concertation au niveau international dans le cadre du programme « Generation IV International Forum ». Les partenaires impliqués ont présélectionné six filières qui apparaissent à ce jour comme les plus prometteuses ; elles se distinguent notamment par le fluide caloporteur utilisé : sodium, hélium, plomb, eau supercritique ou sels fondus. La France a choisi de se positionner sur les réacteurs à caloporteur sodium liquide (du même type que les réacteurs Phénix et Superphénix, on les désigne sous le sigle SFR – *sodium-cooled fast reactor*) ou hélium. Les systèmes de quatrième génération seront en mesure, non seulement de recycler le plutonium mais également de consommer complètement l'uranium 238.

Les RNR (Réacteurs à neutrons rapides), qui valorisent énergétiquement à la fois l'uranium naturel, recyclable ou appauvri, et tous les isotopes du plutonium, apparaissent comme une solution pour la gestion du plutonium, via son multirecyclage. Ils permettent une bien meilleure utilisation de la ressource en uranium naturel, en multipliant par un facteur d'environ 100 la quantité d'énergie produite par la même quantité d'uranium naturel. La technologie des RNR permet de rendre l'énergie nucléaire techniquement durable sur plusieurs millénaires. Ces réacteurs ont également un potentiel de gestion alternative des déchets, grâce en particulier à leur capacité potentielle de transmutation des actinides mineurs.

Les enjeux technologiques relatifs à ces réacteurs de nouvelle génération sont multiples :



- s'agissant des réacteurs de type SFR, les principales difficultés sont liées à l'utilisation d'une boucle de sodium liquide, pour laquelle il est nécessaire de limiter au maximum les risques d'interaction avec l'eau ou l'air (risques de réactions chimiques violentes) ;
- deux types de réacteurs refroidis à l'hélium sont envisageables : réacteur à neutrons rapides (GFR – *Gas-cooled Fast Reactor*) ou réacteur très haute température à neutrons thermiques (VHTR – *Very High Temperature Reactor*). À ce jour, on ne dispose pas de retour d'expérience sur les réacteurs de type GFR ; les priorités à court terme sont l'analyse de la sûreté du réacteur et la conception de l'assemblage combustible, qui doit résister aux hautes températures (environ 850°C). Les réacteurs de type VHTR, quant à eux, nécessiteront le développement de matériaux de structure résistant à de très hautes températures et de composants, tels que les échangeurs, fabriqués à partir de ces matériaux, l'objectif étant d'atteindre une température de fonctionnement de 950-1 000°C. Un des intérêts d'un tel niveau de température est la possibilité d'utiliser cette source de chaleur pour produire massivement de l'hydrogène par décomposition thermochimique de l'eau ou par électrolyse à haute température ;
- enfin, le programme ITER peut offrir des solutions à très long terme mais n'a pas été intégré dans les technologies clés eu égard à un horizon de temps excédant cet exercice.

L'hydrogène en tant que vecteur énergétique

Peu présent en tant que tel dans la nature, ce qui implique de le synthétiser, l'hydrogène possède plusieurs attraits en tant que vecteur énergétique : énergétique (35 kWh/kg contre 15 kWh/kg pour l'essence), sa combustion, qui ne produit que de l'eau, peut être considérée comme « propre ».

Recourir à l'hydrogène à grande échelle suppose de disposer de technologies matures sur chacun des maillons de la chaîne : production en grandes quantités, transport et distribution, stockage, utilisation et, de façon transversale, sûreté. Les défis technologiques sont donc multiples :

- l'hydrogène est déjà produit de façon industrielle par « reformage » du gaz naturel, procédé mature mais qui présente comme inconvénient d'être émetteur de CO₂ ; l'alternative envisagée consiste à décomposer chimiquement l'eau, par électrolyse (un procédé qui reste onéreux) ou par voie thermochimique à haute température, ce qui suppose de disposer de sources de chaleur adéquates (voir les possibilités envisagées avec les réacteurs nucléaires de quatrième génération évoquées plus haut) ;
- au niveau des utilisations, l'hydrogène peut être soit directement utilisé en combustion (moteurs, turbines), soit utilisé pour alimenter une pile à combustible, laquelle produit chaleur et électricité ;
- le stockage et la distribution d'hydrogène posent par ailleurs des problèmes spécifiques, dans la mesure où ce gaz est peu dense et diffuse facilement à travers de nombreux matériaux et assemblages. De ce point de vue, les réservoirs à hydrogène sont des composants clés : s'agissant de ceux destinés à être embarqués sur des véhicules, ils doivent résister à des pressions de stockage très élevées (plusieurs centaines de bars).

Les infrastructures électriques

Les modalités de gestion des réseaux électriques sont appelées à évoluer, sous l'effet de la transformation des marchés de l'électricité et de l'augmentation de productions à caractère intermittent issues de sources renouvelables (solaire et éolien). Les opérateurs doivent assurer l'équilibrage des réseaux dans un contexte de croissance continue de la consommation d'électricité, tout en contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique d'ensemble.

Les évolutions technologiques concernent principalement :

- les équipements qui permettent de gérer efficacement et en temps réel le transit de l'énergie sur le réseau, ainsi que les outils de pilotage et de supervision associés (logiciels et transmission de données) ;
- les moyens de stockage de l'électricité, qui permettent de faire face aux fluctuations de la production et de la consommation ;
- les moyens permettant d'optimiser le profil de consommation au niveau du client final, tels que les compteurs de nouvelle génération, rendant par ailleurs possible le développement de nouvelles offres de service.

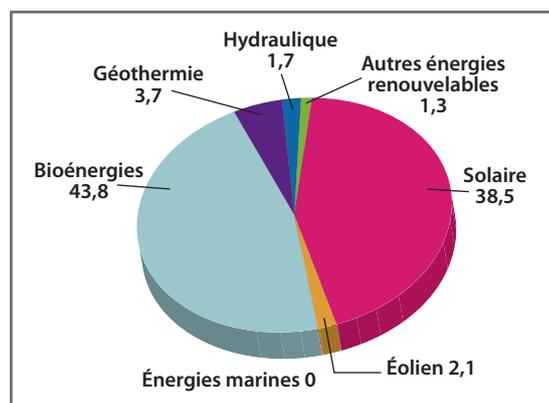
Analyse de la position de la France

La France possédant des ressources en énergies fossiles très limitées, ses efforts en matière de développements technologiques se sont majoritairement orientés, depuis les deux chocs pétroliers, vers des filières lui permettant de rendre son mix énergétique moins dépendant de celles-ci.

C'est ainsi, en particulier, que la France a pu acquérir une position de premier plan dans le domaine du nucléaire. Des budgets significatifs ont par ailleurs été consacrés à d'autres filières, en particulier dans le domaine des énergies renouvelables : géothermie, solaire... Ces derniers ont toutefois été fortement réduits entre 1986 et 2000, une période de faible prix des hydrocarbures ayant débuté par un contre-choc pétrolier ; de plus, les tarifs d'achat de l'électricité produite par ces énergies émergentes n'étaient pas très incitatifs. Une des conséquences a été que les filières industrielles correspondantes sont restées embryonnaires, avec par exemple un seul fabricant de cellules photovoltaïques, un seul fabricant d'éoliennes... De ce point de vue, des pays tels que le Danemark, l'Allemagne ou le Japon ont pu développer un tissu industriel significatif.

La répartition actuelle des budgets de R&D publics français donne des indications sur la façon dont certains enjeux, tels que la lutte contre le changement climatique, ont pu remettre sur le devant de la scène certaines filières.

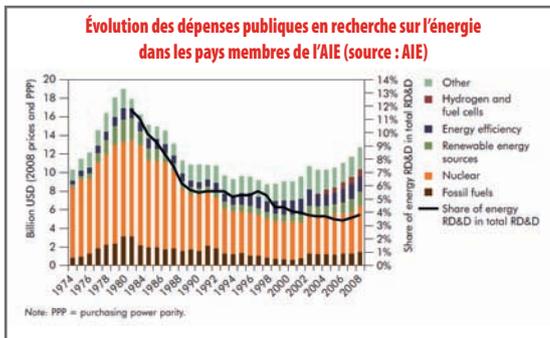
Répartition de la dépense publique en recherche sur l'énergie en 2008, en France (source : DGEC/CGDD)



La filière nucléaire (fission, fusion et gestion des déchets) bénéficiait en 2008 d'environ la moitié des financements. Suivaient ensuite les énergies fossiles (15 %), l'efficacité énergétique (14 %) et les énergies renouvelables (10 %) ; pour ces dernières, la priorité était donnée à l'énergie solaire et aux bioénergies. L'hydrogène et les piles à combustible bénéficiaient de 6 % des financements, soit un niveau comparable à celui de 2006-2007.

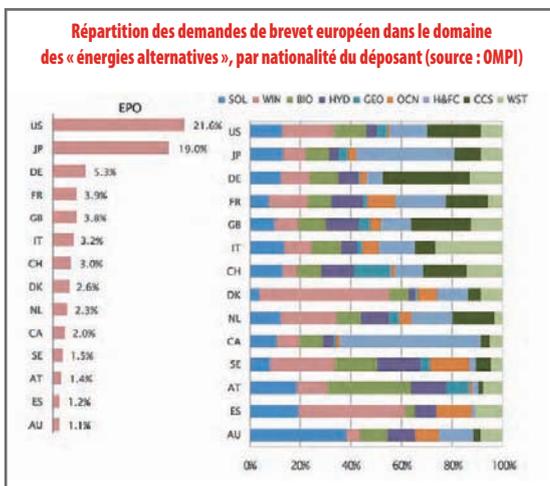
Il faut souligner à ce stade que le tournant pris aux alentours de l'an 2000 a été constaté dans l'ensemble des pays développés. Les budgets publics dédiés à la R&D dans le domaine de l'énergie sont repartis à la hausse, leur part relative dans les budgets

R&D totaux ayant néanmoins tendance à stagner. Actuellement, le budget français est en volume le troisième budget, derrière ceux du Japon et des États-Unis.



On peut également noter que les budgets consacrés aux énergies fossiles, à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables sont en moyenne sensiblement comparables. En revanche, l'hydrogène et les piles à combustibles bénéficient d'un budget équivalant à environ la moitié de celui consacré à chacune de ces filières. Bien entendu, cette structure varie fortement d'un pays à l'autre : ainsi, le Japon, la Corée et le Canada consacrent la plus grande part de leur budget au nucléaire, alors que les budgets les plus significatifs dédiés au charbon se trouvent aux États-Unis et en Australie. La Chine, quant à elle, a choisi de concentrer son soutien sur les filières du solaire et de l'éolien.

Ces éléments ne donnent néanmoins qu'une vue partielle de la situation, puisqu'il manque des données sur les dépenses en R&D des entreprises. De ce point de vue, les données sur les demandes de brevets permettent de dresser un tableau plus large. L'OMPI a ainsi effectué un recensement des brevets dans le domaine des technologies de l'énergie « alternatives », sur une période relativement longue (1978-2005). N'apparaissent donc pas dans ce décompte les demandes de brevet dans le domaine du nucléaire et des énergies fossiles.



S'agissant des demandes de brevet européen, la France arrive globalement en quatrième position, derrière les États-Unis, le Japon et l'Allemagne.

Au niveau de la répartition entre filières, on peut noter que la France ne possède pas de spécialisation réellement marquée, à l'inverse de ce que l'on observe dans le cas du Japon avec l'hydrogène et les piles à combustible, du Canada également sur cette filière, du Danemark avec l'éolien, de l'Allemagne avec le captage et le stockage de CO₂, de l'Autriche avec la biomasse, ou encore de l'Australie avec le solaire. Cette absence de spécialisation marquée se retrouve aussi aux États-Unis, mais ceci s'applique à un volume de brevets cinq fois plus important, ce qui peut autoriser une relative « dispersion » entre les différentes filières.

La France possède un savoir-faire indéniable dans le domaine du nucléaire et des hydrocarbures. S'agissant des « nouvelles » filières, qui ont connu entre 1986 et 2000 une période de relative mise en sommeil, l'enjeu est d'être en mesure de se positionner rapidement, du moins dans le cas des filières n'ayant pas encore atteint un degré de maturité technologique suffisant et pour lesquelles, du point de vue des acteurs, le paysage international n'est pas encore très structuré. Le jeu est ainsi relativement ouvert dans des filières tout juste émergentes dans lesquelles les options sont encore ouvertes, telles que le captage et le stockage de CO₂, ou bien les énergies marines ; dans des filières déjà bien structurées, telles que le solaire photovoltaïque, l'enjeu réside dans la capacité à se positionner sur les nouvelles générations. Enfin, dans des filières telles que l'éolien ou les piles à combustibles, on peut penser que la France pourra se positionner parmi les outsiders.

Les orientations en matière de R&D publique dans le domaine de l'énergie connaissent par ailleurs des évolutions structurelles profondes. Des réflexions ont notamment été initiées par le rapport sur les « nouvelles technologies de l'énergie » (2004) et le rapport sur la « stratégie nationale de recherche dans le domaine énergétique » (SNRE, 2007), qui a fait lui-même l'objet d'une évaluation par l'OPECST en 2009. Le contexte français a récemment été marqué, entre autres, par la mise en place de l'Alliance nationale pour la coordination de la recherche sur l'énergie (Ancre), dont les membres fondateurs sont le CEA, le CNRS et l'IFP Énergies nouvelles, ainsi que par l'instauration d'un fonds démonstrateur de recherche géré par l'Ademe, destiné à la réalisation de prototypes à une échelle suffisamment représentative préfigurant le stade industriel. Doté d'un budget de 375 M€ sur la période 2009-2012, il concerne des thèmes tels que les véhicules décarbonés, les biocarburants de deuxième génération, le captage et le stockage de CO₂, les énergies marines ou les réseaux du futur. Ces filières occupent également une place de choix au sein des « investissements d'avenir », avec des crédits dédiés aux démonstrateurs « énergies renouvelables et chimie verte » (1,35 Md€), à la création d'instituts d'excellence en matière d'énergies décarbonées (1 Md€) ainsi qu'au soutien au nucléaire de demain (1 Md€). Enfin, des travaux pilotés par l'Ademe sous l'égide des ministères en charge de l'énergie et de la recherche ont récemment été initiés afin de qualifier et hiérarchiser plus finement les orientations de recherche de la SNRE.



Recommandations

Une impulsion nouvelle a été donnée aux évolutions dans le domaine de l'énergie suite aux travaux menés dans le cadre du Grenelle de l'environnement. Si certaines dispositions qui ont ensuite été adoptées ont un effet à court terme (retrait des ampoules à incandescence, par exemple), d'autres ont vocation à avoir des effets structurants à plus long terme, avec en particulier des conséquences sur les technologies du domaine de l'énergie en cours de développement ou émergentes. En dehors des mesures spécifiques au bâtiment ou aux transports, on peut citer en particulier :

- la programmation pluriannuelle des investissements (PPI) de production d'électricité et de chaleur (arrêtés du 15 décembre 2009), qui fixe des objectifs en terme de capacités de production à horizon 2020. Par exemple, dans le cas de l'électricité, le solaire devra contribuer à hauteur de 5,4 GW (contre 110 MW en 2008), l'éolien terrestre à hauteur de 19 GW (contre 3,5 GW en 2008) et l'éolien offshore (ainsi que les énergies marines) à hauteur de 6 GW ;
- la création du Comité stratégique des éco-industries (Coséi), lequel a mis en place en son sein un groupe de travail dédié à l'innovation et à la diffusion des éco-technologies.

Face à ces objectifs, la première question qui se pose est celle de la capacité du tissu industriel français de contribuer, à terme, à l'atteinte de ces objectifs, que ce tissu exploite des technologies « tricolores » (existantes ou à développer) ou soit composé en partie d'implantations de grands groupes internationaux installant des capacités de production dans l'Hexagone : dans les deux cas, le bilan en termes d'emplois est positif. L'analyse ne peut toutefois être purement franco-française : dans un certain nombre de cas, les enjeux, en termes de débouchés, sont avant tout internationaux.

Dans ce contexte, plusieurs priorités émergent :

- assurer une bonne cohérence entre les orientations de la politi-

que énergétique nationale, les actions des collectivités, les priorités définies au sein des pôles de compétitivité, la capacité (et la volonté) des filières industrielles françaises et les choix technologiques, tels qu'ils transparaissent dans la répartition du soutien public à la R&D ;

- créer des conditions favorables au développement pérenne des filières, comme le fait de disposer, au niveau des acteurs, d'une visibilité suffisante à moyen-long terme. Dans le domaine de l'énergie, cela concerne en particulier la fiscalité, les tarifs réglementés d'achat de l'électricité (dans le cadre de l'obligation d'achat), ainsi que les prescriptions technologiques dans les achats publics et les normes internationales ;
- opérer des choix clairement assumés.

Concernant ce dernier point, on peut remarquer que la stratégie nationale de recherche et d'innovation (SNRI) a retenu quatre « domaines clés » pour l'énergie : le nucléaire, le solaire photovoltaïque, les biocarburants de deuxième génération et les énergies marines. Ceux-ci sont complétés, au nom de leur contribution potentielle à la lutte contre le changement climatique, par le stockage du CO₂, la conversion de l'énergie (dont les piles à combustible) et l'hydrogène.

Le rapport de l'OPECST sur la SNRE avait toutefois souligné la nécessité de définir des priorités qui soient à la fois validées au plus haut niveau politique, et sélectionnées sur la base de critères de choix explicites, l'objectif étant d'opérer un classement entre, d'un côté, les « paris technologiques », avec comme ambition de se positionner parmi les leaders mondiaux, et, à l'autre extrême, les thèmes pour lesquels le maintien d'une veille technologique est considéré comme suffisant. Les débats menés autour de la SNRE, ceux menés dans le cadre de l'Ancre, ainsi que, dans le cadre du présent exercice, la présentation d'une sélection de 17 technologies clés du domaine de l'énergie, amorcent des pistes de réflexion dans ce sens, qu'il serait souhaitable d'approfondir.



41. Carburants de synthèse issus de la biomasse

Description

Les technologies de production de biocarburants dits de « deuxième génération » sont de deux types :

- la production par voie thermo-chimique, qui consiste à gazéifier la biomasse, puis à purifier le gaz de synthèse ainsi produit et le convertir en carburants liquides (de type Diesel ou Jet Fuel) via des procédés catalytiques ;
- la production par voie biochimique, qui consiste à traiter la biomasse par voie enzymatique, puis à procéder à une fermentation éthanolique.

Ces technologies sont plus particulièrement destinées à la production de biocarburants à partir de biomasse ligno-cellulosique (bois, plantes à croissance rapide, résidus forestiers, etc.).

Les efforts actuels dans ce domaine se concentrent sur les opérations de démonstration, c'est-à-dire sur des pilotes préfigurant la production au stade industriel. Plusieurs verrous restent cependant à lever, qui concernent notamment :

- la purification du gaz de synthèse et sa valorisation à des niveaux moindre de pureté (four verrier,...) ;
- la mise au point de nouvelles enzymes ;
- en amont, la logistique (filières d'approvisionnement).

La « troisième génération », quant à elle, repose sur l'exploitation de la biomasse marine, essentiellement les microalgues, espèces de grande productivité cultivées en masse sur des salines ou encore en photobioréacteurs. Les verrous technologiques portent sur la culture intensive, l'insertion dans l'environnement, l'optimisation de l'extraction des huiles pour la production de biocarburants, ou de la conversion par gazéification. Les perspectives industrielles sont, au mieux, à horizon de dix ans.

Applications

Ces technologies sont dédiées à la production de carburants pour le secteur des transports (terrestres et aériens). Elles sont donc développées en collaboration avec les utilisateurs en aval (constructeurs). Une nouvelle filière

requérant des gaz de synthèse de moindre pureté (four verrier par exemple) est en développement.

Ce sont des technologies relativement complexes, qui mobilisent de multiples compétences :

- conception et fabrication de réacteurs (chaudronnerie) ;
- génie chimique et biochimique (procédés de purification, procédés catalytiques, solvants supercritiques...);
- modélisation complexe des procédés ;
- contrôle et commande de procédé, capteurs ;
- traitement des effluents ;
- logistique ;
- procédés de prétraitement de la biomasse ;
- évaluation des impacts environnementaux des cultures et des impacts socioéconomiques.

Les futurs sites devraient consommer de l'ordre de 1 million de tonnes par an de biomasse chacun ; à titre de comparaison, l'IFP Énergies nouvelles évalue à 47 millions de tonnes la ressource française (bois et paille) potentiellement mobilisable. Cette production contribuera à l'atteinte des objectifs d'incorporation de biocarburants dans le secteur des transports, tels qu'ils ont été fixés par la directive européenne 2003/30 puis renforcés par le gouvernement français.

Enjeux et impacts

Le secteur des transports est directement concerné par la mise en place d'une filière de production de biocarburants de deuxième génération. Elle contribuera à l'indépendance énergétique de l'Europe, à travers une meilleure exploitation des ressources en biomasse.

Par ailleurs, cette filière devrait bénéficier d'une meilleure acceptabilité que la première génération de biocarburants, qui est en concurrence avec les usages alimentaires. À plus long terme, toutefois, si les cultures énergétiques destinées à alimenter les filières « deuxième génération » devaient se développer, des tensions pourraient se manifester au niveau de l'usage des sols (terres arables, en particulier).



Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : CEA, Cirad, CNRS, Ensic, IFP Énergies nouvelles, Ifrmer, Inra, UTC
- **Industrie** : Air Liquide / Lurgi, ARD, Axens, Lesaffre, Maguin, Naskeo, Roquette, Biocar (GDF-Suez), Total
- **Pôles de compétitivité** : Capenergies, Derbi, IAR, Pôle Mer, Pôle Paca, Trimatec

Principaux acteurs étrangers

- Abengoa, Biogasol, BTG, Chemrec Ab, Choren, Enerkem, FZK, Genencor, Novozymes, Sekab, Shell, Solazyme, Synthetic Genomics, TNO, Tub-F, Uhde, VTT

Position de la France

Les programmes de soutien à la R&D engagés depuis quelques années ont permis de mobiliser un nombre d'acteurs significatif. Des projets de démonstration sur la deuxième génération sont lancés ou en cours d'évaluation :

- pilote sur le site de Bure-Saudron en cours d'étude sur la voie thermo-chimique (CEA, Air Liquide, Choren, Cnim...);
- fonds démonstrateurs géré par l'Ademe : production de biométhane par gazéification (GDF Suez) et projet de pilote sur la voie de biochimique, BioTFuel (CEA, IFP Énergies nouvelles, Sofiproteol et Total);
- plateforme d'innovation bioraffinerie recherches et innovations, Marne (labellisée par le pôle IAR), au sein duquel sera développée Futurool, éthanol de deuxième génération.

Par ailleurs, certaines compétences clés sont bien représentées en France : par exemple les procédés catalytiques, que ce soit au niveau académique ou industriel.

La France ne dispose toutefois pas d'une masse critique d'acteurs comparable à celle de la région de Freiberg, en Allemagne, sur la voie thermo-chimique. Aux États-Unis, l'importance des programmes de recherche dédiés à l'éthanol cellulosique a permis à ce pays d'être très en avance dans ce domaine.

Pour les biocarburants de troisième génération, plusieurs pôles de compétitivité coopèrent afin de contribuer à l'élaboration d'une filière des microalgues industrielles.

Analyse AFOM

Atouts

- Soutien public à la R&D.
- Maîtrise de certaines étapes-clés des procédés.
- Potentiel de ressources exploitables (biomasse ligno-cellulosique, biomasse marine).

Faiblesses

- Lancement tardif de projets de pilotes de démonstration.
- Faible degré de structuration des filières d'approvisionnement.

Opportunités

- Augmentation du coût des carburants d'origine fossile.
- Demande des secteurs automobile et aéronautique.

Menaces

- Opérations pilotes de démonstration plus avancées ailleurs en Europe et aux États-Unis, avec d'ores et déjà des retours d'expérience.
- Concurrence de la part de pays disposant de masses critiques de compétences : Allemagne (voie thermo-chimique) et États-Unis (voie biochimique).

Recommandations

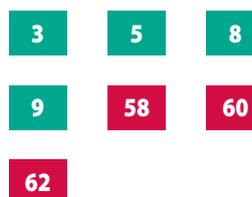
Dans une approche globale, il s'agit de compléter les aspects technologiques par des travaux en matière de bilans économiques (analyse fine des coûts de production prévisionnels, intégrant l'amont), de bilans environnementaux, de scénarios de mobilisation de la ressource...

De plus, il sera nécessaire de coupler les objectifs en matière d'incorporation de biocarburants dans les carburants pour l'automobile avec le potentiel de biomasse disponible, en tenant compte des arbitrages nécessaires (conflits d'usage). On peut souligner au passage que ce potentiel ne pourra être mobilisé qu'à condition que les filières d'approvisionnement se structurent.

Par ailleurs, afin de diversifier les usages, le développement de la « bioraffinerie » doit être soutenu : cette approche intégrée combine sur une même plateforme différents modes de valorisation de la biomasse (biocarburants et valorisation matière).

Enfin, il est nécessaire de poursuivre et de concentrer les investissements dans un nombre limité de projets de démonstration. Ces projets permettront de plus aux sous-traitants (ingénierie, chaudronnerie, instrumentation...) d'acquérir les compétences nécessaires pour se positionner sur ces nouveaux marchés.

Liens avec d'autres technologies clés



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



42. Solaire thermodynamique

Description

Le principe du solaire thermodynamique (ou thermique à concentration - STC) consiste à collecter et à concentrer l'énergie solaire de façon à produire de la chaleur, puis à convertir celle-ci en électricité via un cycle thermodynamique (une ou deux boucles avec un fluide en circulation, couplées à une turbine).

Les installations de production d'énergie basées sur ce principe se répartissent en trois catégories :

- les centrales à tour, dans lesquelles les capteurs (miroirs) réfléchissent le rayonnement solaire vers un récepteur central placé au sommet d'une tour ; la centrale française Thémis (inaugurée en 1983) en est un exemple historique ;
- les centrales à capteurs linéaires, dans lesquelles le rayonnement est concentré vers un tube récepteur parallèle aux capteurs, et à l'intérieur duquel circule un fluide caloporteur ; il en existe deux versions : les capteurs de type cylindro-parabolique (en référence à la forme des miroirs) ; les capteurs de type Fresnel, qui consistent en un assemblage de miroirs plats longitudinaux disposés parallèlement mais inclinés différemment ; dans tous les cas, la géométrie adoptée permet d'obtenir l'effet de concentration ;
- les centrales de type parabole-Stirling, dans lesquelles chaque miroir parabolique est équipé d'un moteur Stirling au niveau duquel le rayonnement est concentré.

La faisabilité technique de ce type de système est déjà en partie démontrée mais il subsiste toutefois plusieurs verrous technologiques à lever :

- de façon générale, les rendements doivent être encore améliorés, par exemple en augmentant le facteur de concentration du rayonnement solaire, ou en utilisant un fluide caloporteur fonctionnant à plus haute température ;
- les cycles de fonctionnement peuvent être optimisés de façon à maximiser la production d'électricité en fonction des périodes diurnes-nocturnes ; une solution consiste à coupler le système à un stockage de chaleur performant, sachant par ailleurs qu'aucune solution de stockage n'est à l'heure actuelle réellement satisfaisante.

Applications

Le regain d'intérêt pour le STC après plusieurs programmes de R&D durant les années 80, date d'une dizaine d'année.

À ce jour, le marché du STC est encore embryonnaire ; on comptait fin 2009 l'équivalent de 710 MW installés et en fonctionnement dans le monde (source AIE). Actuellement, les annonces de projet représentant l'équi-

valent de plusieurs centaines de MW de capacité supplémentaire par an se multiplient.

Le marché est aujourd'hui dominé par les industriels américains, allemands et espagnols. Plusieurs acteurs français essaient activement de se positionner sur ce marché, soit par des développements menés en propre (CNIM, Solar Euromed), soit par des acquisitions, comme dans le cas d'Areva avec le rachat d'Ausra, ou d'Alstom (participation significative dans BrightSource Energy).

Enjeux et impacts

La filière STC a développé plusieurs démonstrateurs en fonctionnement. Selon les projections de l'AIE, le STC pourrait fournir jusqu'à 10 % de l'électricité au niveau mondial à l'horizon 2050.

Le STC est plus particulièrement adapté aux régions à fort ensoleillement, dans des zones pouvant accepter de grandes emprises foncières : les zones désertiques ou semi-désertiques des États-Unis, d'Afrique du Nord, du Moyen-Orient... sont potentiellement les plus prometteuses. À titre d'illustration, le Plan solaire méditerranéen, qui est un des projets phares de l'Union pour la Méditerranée, portée par la France, constitue un cadre très favorable au développement du solaire pour la production d'électricité (y compris par la filière STC), avec un objectif ambitieux de 20 GW (toutes filières confondues) mis en service d'ici à 2020.

Pour les acteurs français, les principaux enjeux économiques se situent donc à l'export. Ils peuvent aussi se positionner sur certains composants clés, tels que les réflecteurs.

Bien qu'associé à l'image « verte » du solaire, le STC peut rencontrer quelques difficultés d'acceptabilité. Le principal obstacle résulte de l'emprise au sol nécessaire, ce qui l'exclut des zones urbanisées et des zones agricoles. De fait, ce type de centrale pourrait être implanté majoritairement loin des zones de consommation d'énergie, ce qui implique le développement d'infrastructures de transport de l'électricité adéquates. Par ailleurs, certaines des filières présentent des risques industriels spécifiques : ainsi, certains cycles utilisent comme fluide caloporteur des huiles qui présentent des dangers en cas d'accident ; des systèmes de stockage mettent en œuvre de grandes quantités de nitrates (sous forme de sels fondus), lesquels présentent des risques d'explosion. Ces limites sont toutefois bien connues, et des alternatives existent, comme l'utilisation de vapeur d'eau comme fluide caloporteur.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : Armines, CEA/Ines, Promes
- **Industrie** : Alstom, Areva, Cnim, Saint Gobain, Solar Euromed
- **Pôles de compétitivité** : Capenergies, Derbi

Principaux acteurs étrangers

- Abengoa, Acciona, E-solar, Novatec Biosol, Siemens, Solar Millenium, Stirling Energy Systems...

Position de la France

Le cumul d'expérience qui avait été acquis avec la centrale Thémis n'a pas été entièrement perdu : il subsiste des compétences académiques, mobilisables pour les aspects les plus fondamentaux (transferts thermiques, cycles thermodynamiques...). Une filière industrielle reste donc à construire, un rattrapage technologique étant par ailleurs susceptible d'être effectué rapidement.

Par ailleurs, la France dispose de l'essentiel des compétences techniques à mobiliser pour de tels projets, en particulier des compétences en ingénierie d'installations complexes (Technip) pour la production d'électricité et de chaleur ou encore sur les technologies de miroirs (Saint Gobain).

Analyse AFOM

Atouts

- Mobilisation active d'acteurs industriels.
- Capacité à répondre à des appels d'offres internationaux.

Faiblesses

- Absence de marché intérieur susceptible de servir de « vitrine » à l'international.
- Démarrage tardif des projets nationaux.

Opportunités

- Besoins en électricité de pays en voie de développement à fort ensoleillement.
- Grands programmes internationaux, tels que le projet DII GmbH (précédemment Desertec) qui doit faire l'objet d'une analyse d'ici à 2012 ou le Plan solaire méditerranéen.

Menaces

- Dépendance technologique sur certains composants critiques, tels que le tube récepteur.
- Concurrence de plusieurs grands groupes internationaux.

Recommandations

L'enjeu principal, pour la France, est la capacité à élaborer une offre suffisamment solide, en mesure de prendre des parts de marché sur les marchés internationaux qu'il serait souhaitable de ne pas aborder en ordre dispersé. Ces nouveaux marchés constituent également une opportunité pour la constitution d'un tissu de PME sous-traitantes, indispensables pour la fourniture d'une partie des multiples composants nécessaires à la construction des centrales STC.

Liens avec d'autres technologies clés

6

7

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



43. Énergies marines

Description

Les technologies des énergies marines visent spécifiquement les énergies renouvelables issues des ressources de la mer, hors énergie éolienne en mer.

À la différence de la plupart des autres technologies clés, il s'agit d'un ensemble de technologies relativement hétérogène, s'appuyant sur des principes physiques différents et caractérisé par la source d'énergie exploitée :

- l'énergie des courants marins qui consiste à tirer parti de l'énergie cinétique des courants et des courants côtiers dus à la marée par des hydroliennes qui transforment l'énergie cinétique en énergie électrique ;
- l'énergie houlomotrice, qui consiste à transformer l'énergie des vagues au moyen de convertisseurs d'énergie en énergie électrique par diverses techniques : colonne d'eau oscillante, rampe de franchissement, flotteur vertical, flotteur articulé ;
- l'énergie thermique qui consiste à exploiter les différences de température entre la surface et les profondeurs, essentiellement dans les zones tropicales, pour produire de l'électricité, de l'eau douce, du froid pour la climatisation et des produits dérivés pour l'aquaculture. De rendement faible, elle suppose la mise en place d'infrastructures lourdes ;
- la pression osmotique qui utilise les différences de concentration en sel en interposant des membranes semi-perméables et l'électrodialyse inversée, notamment au niveau de l'estuaire des fleuves ;
- l'énergie marémotrice qui consiste à exploiter l'énergie potentielle de la marée liée elle-même à une différence de niveau entre deux masses d'eau ;

La maturité des technologies est très variable, l'énergie marémotrice, houlomotrice et les courants sont les plus avancées, avec quelques installations marémotrices commerciales dans le monde, des sites pilotes pour les énergies hydroliennes et houlomotrices. L'énergie thermique et la pression osmotique doivent encore faire l'objet de développement. L'usage industriel des technologies les plus avancées citées pourrait intervenir à un horizon de cinq ans.

Selon l'énergie considérée, il existe différentes familles de technologies qui ne présentent pas forcément les mêmes types de verrous technologiques. Dans tous les cas, il s'agit de prendre en compte un environnement soumis à des conditions sévères de vent, vagues, courants, salinité, etc. Les verrous peuvent être classés par groupes fonctionnels :

- conception mécanique et fabrication : fabrication et assemblage de structures marines de grande envergure et application de matériaux alternatifs (béton, composite) pour des coques économiques et durables ;

- conception électrique : ancrages et câbles électriques, systèmes de connexion électrique en milieu marin, connexions tournantes ;
- installation en milieu marin : mise à l'eau simplifiée de structures de plusieurs centaines de tonnes, méthode de remorquage et de mise à poste, installation et assemblage des ensembles en milieu marin ;
- ancrage adapté au sol : de types classique (navire), gravitaire, pieux enfoncés dans le sol ;
- contrôle commande des machines ou des parcs de machines : pour optimiser la production d'énergie et limiter les efforts mécaniques ;
- convertisseurs d'énergie : dimensionnement du stockage de l'énergie, comportement des machines et composants en mer, fatigue ;
- raccordement électrique : comportement dynamique du câble, diminution des pertes électriques, optimisation ;
- exploitation et maintenance : moyens d'accès en toute sécurité, survie en conditions extrêmes ;
- démantèlement afin de restituer le site, après exploitation, dans un état le plus proche possible des conditions initiales.

Applications

La principale application visée est la production d'électricité. Les autres champs d'application sont la production de froid pour la climatisation et les produits dérivés pour l'aquaculture.

La majeure partie des capacités installées sont de type marémotrice, avec trois usines marémotrices dans le monde représentant 270 MW de capacité installée en 2008, dont celle de la Rance (240 MW), construite en 1960. Les énergies marines [source : association European Ocean Energy] pourraient totaliser 3,6 GW de capacité en 2020, représentant 26 000 emplois directs pour un investissement d'environ 8,5 Md€. La France représente 0,8 GW dans ce scénario.

Enjeux et impacts

Grâce à son littoral, la France dispose d'une zone maritime de 11 millions de km², dont elle contrôle l'exploitation et au sein de laquelle la production d'électricité pourrait se développer.

Des interrogations subsistent quant à l'intégration dans le milieu du point de vue environnemental et anthropique. Les énergies marines devront en particulier démontrer qu'elles ne perturbent pas les écosystèmes marins.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : École centrale de Nantes, Ensieta, Ifremer, INP Grenoble
- **Industrie** : Alstom, DCNS, EDF EN, GDF-Suez, Geocan, Oceanide, Sabella, Saipem, Technip
- **Pôles de compétitivité** : Capenergies, Pôle Mer Bretagne Pôle Mer Paca, Tenerrdis

Principaux acteurs étrangers

- Iberdrola, SAIPEM, Statkraft, Marine Current Turbine, Pelamis, Sapphyre, Voith Siemens, Wave Dragon

Analyse AFOM

Atouts

- Un large territoire maritime.
- Installation en cours d'hydroliennes à Paimpol-Bréhat, 6 MW, par EDF.
- Initiative Ipanema visant à favoriser l'émergence d'une filière complète.

Faiblesses

- Environnement juridique et administratif complexe.
- Tarif d'achat de l'énergie peu incitatif.

Opportunités

- Possibilités de participation active à des projets de coopération à l'international.

Menaces

- Un impact environnemental mal cerné, avec des conflits d'usage possibles.
- Financements nécessaires élevés, donc difficiles à mobiliser, pour des perspectives s'inscrivant dans le long terme.

Recommandations

Les perspectives de développement des énergies marines s'inscrivent dans le long terme. À ce titre, il est nécessaire de maintenir un effort de R&D régulier sur une longue durée (horizon 2020), incluant la mise au point de démonstrateurs. Les investissements doivent être prévus en fonction de la capacité à industrialiser des acteurs privés.

Plusieurs des pistes explorées représentent des ruptures technologiques, pour lesquelles la France est en position d'affirmer une ambition industrielle.

Liens avec d'autres technologies clés

49

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



44. Piles à combustible

Description

Une pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse : elle permet de produire de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène. Le seul produit direct de la conversion est de la vapeur d'eau.

De façon schématique, une pile à combustible comprend une anode, au niveau de laquelle l'hydrogène est introduit, une cathode, au niveau de laquelle l'oxygène est introduit, ces deux électrodes étant séparées par un électrolyte, par lequel transitent les porteurs de charge.

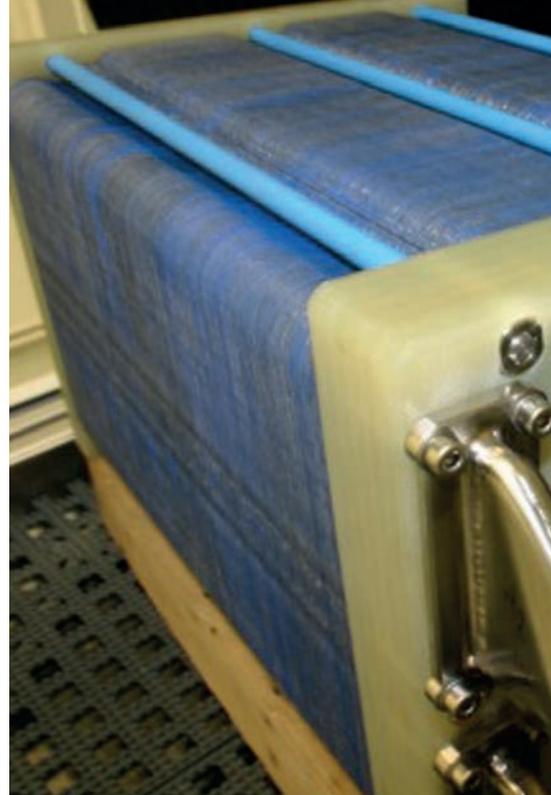
Les différents types de pile à combustibles se distinguent par la nature des électrodes et surtout de l'électrolyte utilisé. Pour des applications stationnaires, les principaux sont les suivants :

- PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*), qui se caractérise par l'utilisation d'une membrane polymère comme électrolyte ;
- SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*), dont l'électrolyte est en céramique (zircone) ;
- PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*) et MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*), dont l'électrolyte (respectivement l'acide phosphorique et des carbonates) est solide à température ambiante, mais liquide à la température de fonctionnement de la pile.

Chacune de ces piles fonctionne à des températures plus ou moins élevées : 70-150°C pour les PEMFC, 180-220°C pour les PAFC, 600-660°C pour les MCFC et 700-1000°C pour les SOFC. On peut noter au passage que la chaleur contenue dans la vapeur d'eau produite peut être récupérée (cogénération). Un fonctionnement à température élevée permet d'accélérer la réaction hydrogène-oxygène, mais impose d'utiliser des matériaux adaptés ; pour un fonctionnement à température plus basse, le recours à un catalyseur (en général, du platine) est nécessaire.

Malgré les efforts consacrés à cette famille de générateurs, plusieurs verrous technologiques freinent leur diffusion à plus grande échelle :

- sensibilité aux impuretés présentes dans les gaz qui alimentent la pile (composés soufrés, en particulier) ;
- mise au point de matériaux et de composants susceptibles de fonctionner à haute température (SOFC) et/ou en milieu agressif (MCFC) ;
- recherche d'alternatives afin de limiter les risques d'approvisionnement : catalyseurs (alternative au platine, dont les ressources sont limitées), membranes polymères (alternative au principal fournisseur américain actuel) ;
- réduction du temps nécessaire au démarrage pour les piles fonctionnant à haute température ;
- augmentation de la durée de vie.



Applications

En dehors des applications spatiales, les premiers modèles de pile à combustible ont été mis sur le marché au début des années 1990. À ce jour, toutefois, très peu de produits ont atteint une réelle maturité commerciale.

En 2008, les ventes mondiales de piles à combustible pour applications stationnaires ont été de l'ordre de 2 250 unités, contre environ 250 en 2001. Il s'agissait principalement (plus de 90 %) de PEMFC de petite puissance (moins de 10 kW) ; les puissances plus élevées (50 unités vendues en 2008) sont dominées par les PAFC et les MCFC.

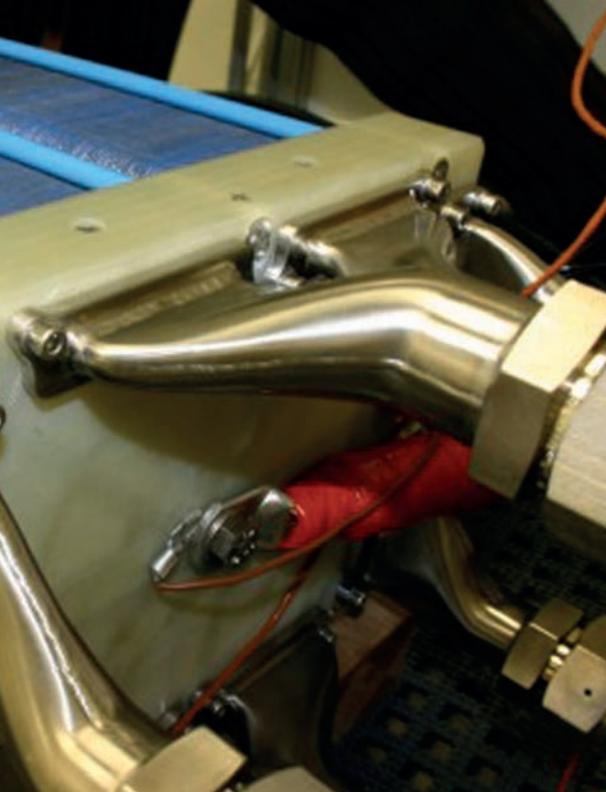
Il est délicat de prédire quel sera à l'avenir la taille du marché des piles à combustible, tant les estimations passées se sont révélées hasardeuses. Pour les applications stationnaires, les deux segments principaux seraient les suivants :

- les installations de production décentralisée, de quelques centaines de kW, éventuellement utilisées en cogénération : hôpitaux, immeubles tertiaires, habitat collectif... ;
- les unités de petite puissance, qui peuvent également s'adresser au secteur résidentiel-tertiaire, dont certaines applications spécifiques : installations de secours, alimentation de sites isolés, microcogénération...

Un autre usage possible serait le stockage tampon de l'électricité : celle-ci serait utilisée pour produire de l'hydrogène, lequel serait stocké puis utilisé ultérieurement pour alimenter une pile à combustible.

La tendance observée depuis une dizaine d'années est nettement une croissance de ce marché, principalement pour les unités de petite puissance. Cette croissance régulière devrait se poursuivre dans les prochaines années, sans toutefois s'accélérer à court terme, le coût des piles à combustible restant élevé (entre 6 000 et 10 000 € le kW), avec une durée de vie encore trop limitée.

D'autres types d'applications sont expérimentés : transports (production d'électricité embarquée à bord d'un véhicule) et appareils électriques portables.



Enjeux et impacts

Actuellement, la plupart des installations en service sont alimentées en gaz naturel, en l'absence d'une infrastructure de distribution d'hydrogène adéquate. Le gaz naturel est lui-même transformé par « reformage » avant d'être injecté, opération qui a pour conséquence l'émission de CO₂. Un fonctionnement en mode réellement « décarboné » nécessitera l'avènement d'une économie de l'hydrogène, qui s'inscrit dans une perspective à long terme.

Par ailleurs, le fonctionnement en cogénération (production d'électricité et de chaleur) permet d'améliorer l'efficacité énergétique (secteur résidentiel-tertiaire dans le cas présent).

La pile à combustible bénéficie d'une image positive : en première approche, il n'y a pas d'émissions polluantes, seulement de la production d'eau. Toutefois, les risques liés à l'utilisation de l'hydrogène (même s'ils ne sont pas fondamentalement différents de ceux liés au gaz naturel), le coût élevé de la technologie et sa diffusion sans cesse repoussée pourraient limiter son usage à quelques applications de niches.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : CEA, IRCELyon, LEMTA, LEPMI... ;
- **Industrie** : Axane (Air Liquide), Dalkia (Veolia), EDF, GDF Suez, Helion (Areva)...
- **Pôles de compétitivité** : Astech, Capenergies, Derbi, Pôle « Véhicule du Futur », Tenerrdis, S2E2

Principaux acteurs étrangers

- Ansaldo Fuel Cells, Ballard, Fuelcell Energy, Hexis, Hydrogenics, NGK Insulators, P21, Plug Power, Topsoe Fuel Cell, Toshiba, UTC Power...

Position de la France

La filière industrielle française des piles à combustibles est encore émergente. Elle comprend pour l'essentiel deux filiales de grands groupes positionnés ou souhaitant se positionner sur l'hydrogène. Au niveau international, les principaux acteurs sont nord-américains (États-Unis et Canada), lesquels bénéficient d'un cumul d'expérience de plus de vingt ans et sont donc technologiquement plus avancés, et, dans une moindre mesure, japonais et européens.

Analyse AFOM

Atouts

- Mise en réseau des acteurs (réseau PACo puis plateforme HyPaC).
- Complémentarité des compétences industrielles et académiques.
- Continuité du financement public de la R&D (programmes PAN-H puis HPAC de l'ANR).

Faiblesses

- Nombre relativement limité d'entreprises impliquées.

Opportunités

- Progression régulière des ventes annuelles au niveau mondial.
- Couplage avec le développement des technologies de l'hydrogène.

Menaces

- Avance technologique nord-américaine et japonaise.
- Difficultés d'approvisionnement pour certains matériaux et composants.
- Programmes de démonstration dans le résidentiel déjà en place au Japon et en Allemagne.

Recommandations

Les recherches menées ces dernières années doivent être poursuivies par les organismes de recherche afin de préparer les technologies de rupture et en développant encore le partenariat public-privé. Des projets de démonstration doivent être appuyés dans une logique de multiplication des applications.

Liens avec d'autres technologies clés

5

45

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



45. Technologies de l'hydrogène

Description

L'utilisation de l'hydrogène comme nouveau vecteur énergétique suppose de maîtriser l'ensemble des maillons de la chaîne : production, stockage, transport et distribution.

L'hydrogène est d'ores et déjà produit de façon industrielle par reformage du gaz naturel ou d'hydrocarbures liquides, ainsi que par gazéification du charbon ; leur principal inconvénient est de produire de grandes quantités de CO₂. Des alternatives sont néanmoins possibles : l'électrolyse basse température, encore limitée par son faible rendement et son coût ; la gazéification de la biomasse, couplée à une purification et une séparation du gaz de synthèse ; l'électrolyse haute température-haute pression, encore expérimentale ; la dissociation thermochimique de l'eau, également expérimentale, et qui suppose de disposer une source de chaleur à haute température (plus de 850°C) et en grande quantité.

Le stockage de l'hydrogène pose des problèmes spécifiques, dû à sa faible densité et à sa tendance à migrer à travers les matériaux. Il peut être stocké sous forme gazeuse dans des conteneurs sous très haute pression, ou bien sous forme liquide (stockage cryogénique) ; une alternative consiste à stocker l'hydrogène dans un matériau solide (hydrures métalliques, par exemple). Ces modes de stockage sont encore limités pour des raisons de coût, de rendement énergétique et/ou d'encombrement.

Enfin, du point de vue du transport et de la distribution, plusieurs options sont ouvertes, avec des modes d'organisation différents selon que la production est centralisée ou sur site ; le transport peut être effectué par un véhicule dédié ou via un réseau (canalisations). Durant le transport, l'hydrogène peut lui-même être stocké dans un conteneur de grande capacité, ou dans des cylindres ou cartouches, ces derniers étant livrés à l'utilisateur final. D'un point de vue logistique, de multiples organisations sont techniquement possibles, mais nécessitent d'être optimisées.

En aval, l'hydrogène peut alimenter une pile à combustible destinée à produire électricité et chaleur.

Applications

Le développement d'infrastructures dédiées à l'hydrogène sera lié à son utilisation dans trois secteurs principaux :

- production d'énergie (électricité et chaleur) dans des installations stationnaires ;
- véhicules à piles à combustible (avec stockage embarqué d'hydrogène) ;
- applications portables (appareils électriques).

Les enjeux se situent essentiellement au niveau des deux premiers secteurs, qui nécessitent une production d'hydrogène suffisante et une logistique en conséquence.

Actuellement, la consommation d'hydrogène mondiale est d'environ 57 Mt/an (dont 8 Mt en Europe), soit 630 milliards de Nm³. Il est produit quasi-exclusivement à partir de ressources fossiles, et est destiné à 85 % au raffinage de produits pétroliers et à la production d'ammoniac. Cette production, si elle était utilisée à des fins énergétiques, ne représenterait que 1,7 % de la consommation d'énergie primaire au niveau mondial (source : association AFH2) ; il faudrait donc que la production d'hydrogène gagne un ordre de grandeur pour que ce vecteur énergétique puisse occuper une place significative dans le bilan énergétique. Ce scénario n'a toutefois de sens que dans la mesure où la technologie des piles à combustible atteint une maturité suffisante (coût et durée de vie).

Enjeux et impacts

Le principal attrait de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique est que sa combustion ne produit directement aucune émission de CO₂ ; le bilan global peut néanmoins être très différent, selon la façon dont l'hydrogène a été produit. Il pourrait donc être amené à jouer un rôle significatif dans le domaine des énergies décarbonées si une infrastructure adéquate est déployée à grande échelle, s'apparentant à une véritable transition énergétique vers une « économie de l'hydrogène » et s'inscrivant nécessairement dans le long terme. Alternativement, les applications de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique pourraient rester cantonnées à des applications de niche. Selon le « modèle » qui se mettra en place, les implications du point de vue des investissements en infrastructures seront significativement différentes.

Selon l'étude prospective WETO-H2, publiée en 2007, si les tendances actuelles se maintiennent, l'hydrogène ne représenterait que 2 % de la consommation énergétique mondiale en 2050 (3 % en Europe). Concernant les infrastructures, le projet européen HyWays a analysé plusieurs scénarios prospectifs montrant qu'un déploiement à grande échelle de l'hydrogène pour l'automobile nécessiteraient des investissements cumulés pour

les infrastructures à hauteur de 60 Md€ pour un parc de 16 millions de véhicules à l'horizon 2027.

Par ailleurs, l'hydrogène pourrait soulever des questions du point de vue de l'acceptabilité, du fait de son usage comme combustible. Des travaux spécifiques aux normes de sécurité ont d'ailleurs été initiés dans la perspective du déploiement d'une infrastructure dédiée à l'hydrogène. Une autre difficulté réside dans le décalage entre les « promesses » de l'économie de l'hydrogène, qui a pu être « survendue », et l'implémentation effective de ces technologies. Ainsi les stratégies actuelles des États membres de l'Union européenne et des constructeurs en matière de véhicules décarbonés s'orientent davantage vers les véhicules hybrides et électriques.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : CEA, IFP, CNRS
- **Industrie** : Air Liquide, Areva, Ceth, Mahytec, Mc Phy, N-GHY, Ullit
- **Pôles de compétitivité** : Axelera, Capenergies, Derbi, Tenerrdis, S2E2

Principaux acteurs étrangers

- Air Products, BP, Linde, Praxair

Position de la France

La France bénéficie avec Air Liquide de la présence sur son territoire d'un des leaders mondiaux de l'hydrogène.

La filière hydrogène mobilise un nombre relativement restreint d'acteurs français, mais l'ensemble de la chaîne est couverte, jusqu'aux usages finaux. Le niveau de soutien aux travaux de R&D menés dans ce domaine, ainsi que la façon dont ce soutien se répartit en fonction des secteurs d'application, a récemment été remis en cause par un rapport de l'OPECST de 2009 qui a soulevé la question d'un éventuel déséquilibre entre le soutien accordé aux véhicules à piles à combustible et celui accordé aux véhicules électriques équipés uniquement de batteries et aux véhicules hybrides.

Analyse AFOM

Atouts :

- Continuité du financement public de la R&D (programmes PAN-H puis HPAC de l'ANR).
- Présence d'un des leaders mondiaux.
- Mise en réseau des acteurs.

Faiblesses

- Nombre relativement limité d'entreprises impliquées.
- Logistique lourde à déployer (transports, stockage).

Opportunités

- Soutien européen aux activités de R&D à travers la structure « Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking ».
- Disponibilité de plusieurs briques technologiques pour la production ou le stockage.

Menaces

- Risque de distanciation dans une compétition internationale accélérée, (États-Unis, Japon).
- Concurrence d'autres filières vertes.

Recommandations

Les recherches menées ces dernières années doivent être poursuivies par les organismes de recherche afin de préparer les technologies de rupture et en développant encore le partenariat public-privé. L'objectif visé d'une production massive d'hydrogène sans CO₂, passe par le développement de projets de démonstration sur les procédés et la structuration d'une offre globale pour la filière.

Liens avec d'autres technologies clés

44

62

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



46. Captage, stockage et valorisation du CO₂

Description

La filière du captage et du stockage du CO₂ consiste à capter le dioxyde de carbone produit par des sites industriels puis à le comprimer, le transporter et le stocker dans une formation géologique de manière permanente et sûre pour l'environnement.

Trois voies de captage sont possibles :

- la postcombustion, qui consiste à capter le CO₂ dans les fumées de combustion ;
- l'oxycombustion, qui intervient plus en amont et remplace le comburant classique (air) par de l'oxygène, produisant des effluents à haute teneur en CO₂ ;
- la précombustion s'appuie sur un concept différent qui consiste à gazéifier le combustible, puis après modification, à séparer le CO₂ et l'H₂.

Le CO₂, après séparation, est comprimé puis transporté, par conduite ou par navire, jusqu'au lieu de stockage géologique où il est « injecté » (anciens gisements d'hydrocarbures, aquifères salins (sur terre et en mer), etc.).

Si parmi les trois principales voies de captage, aucune ne ressort aujourd'hui comme prioritaire, le choix d'une technologie par rapport à une autre dépend du type d'installation (taille, combustible, fonctionnement) et du type de mise en œuvre du captage du CO₂ (installation nouvelle ou existante).

La technologie postcombustion est la plus avancée ; des démonstrations sont en cours à l'international (plateforme Sleipner en Norvège, 1 million de tonnes de CO₂ injectées chaque année). La technologie de captage par oxycombustion fait également l'objet d'opérations de démonstration de recherche sur le territoire national (site de Lacq). Les premiers déploiements industriels pour équiper des centrales thermiques devraient intervenir à partir de 2020.

Les futurs axes de développement de la filière portent sur la maîtrise du captage du CO₂ afin de rendre les technologies moins énergivores et coûteuses. Le transport du CO₂ capté est une technologie relativement maîtrisée et son adaptation pour les centrales électriques (gaz, charbon) ne devrait pas nécessiter de modifications majeures. Enfin, pour que le stockage de CO₂ soit applicable à grande échelle, de nombreux défis technologiques, portant notamment sur la gestion du risque, doivent être relevés. Pour cela, il est nécessaire de :

- étudier l'injectivité du CO₂ ;
- contrôler les impuretés ;
- suivre le panache de CO₂ dans le réservoir ;
- réduire les incertitudes quant aux potentiels sites de stockage du CO₂ et de leur comportement sur le très long terme ;
- définir des normes de validations des sites ;
- concevoir les techniques de fermeture des sites.

Applications

Le marché du captage et du stockage du CO₂ se structurera essentiellement dans les secteurs les plus fortement émetteurs de CO₂ incluant : les industries grosses consommatrices d'énergie (verre, papier, ciment, métallurgie, sidérurgie...), les centrales de production d'électricité et l'industrie pétrolière et gazière qui mobilise la réinjection du dioxyde de carbone dans les champs d'exploitation (50 millions de tonnes de CO₂ chaque année).

Le stockage du CO₂ est une des principales technologies de réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère pour lequel de 2,5 à 3 Md\$ devraient être investis annuellement de 2010 à 2020 [source : AIE].

En France, les perspectives de marché portent sur les bassins industriels fortement émetteurs.

Dans les prochaines années, le marché sera principalement constitué d'unités de démonstration sur des centrales électriques avec une centaine de projets à grande échelle attendus d'ici 2020, représentant un investissement de 26 Md\$ [source : AIE/CLSF *Report to the Muskoka 2010 G8 Summit*].

Le marché est principalement à l'international où les producteurs d'électricité sont d'importants émetteurs de CO₂ (États-Unis, Chine, Inde, etc.).

Enjeux et impacts

Le CO₂ contribuant à hauteur de 55 % à l'effet de serre anthropique, la technologie de captage et de stockage géologique du CO₂ vise à participer à la réduction par deux des émissions mondiales de CO₂ d'ici à 2050.

Le paquet « énergie-climat » adopté fin 2008 par le Parlement européen comprend une directive qui établit un cadre juridique pour les activités de stockage géologique du CO₂. La directive 2009/31/CE « relative au stockage géologique du dioxyde de carbone » a été votée le 23 avril 2009. Elle définit les conditions de sélection des sites de stockage, met en place un système de permis de stockage et prévoit les obligations relatives à l'exploitation, la fermeture et la post-fermeture d'un site de stockage.

Un important travail pédagogique et de dialogue avec les différents acteurs sociaux et la population qui réside à proximité des sites de stockage envisagés devra être effectué, avec des garanties de transparence et de contrôles indépendants.

Enfin, un enjeu majeur réside au niveau de l'équation économique de telles opérations. De tels projets seront fortement capitalistiques, et les modèles économiques permettant de les rentabiliser sont encore incertains.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : BRGM, IFP Énergies nouvelles, Ineris, IPG (Paris)
- **Industrie** : Air Liquide, Alstom, ArcelorMittal, CGGVeritas, EDF, GDF-Suez, Geogreen, Géostock, Technip, Total, Veolia
- **Pôle de compétitivité** : Avenia

Principaux acteurs étrangers

- Foster Wheeler, General Electric, Halliburton, Mitsubishi Heavy Industries, Schlumberger, Siemens

Position de la France

Les compétences françaises dans le domaine du captage et du stockage du CO₂ sont avérées, alors que, paradoxalement, les perspectives de mise en œuvre sur le territoire national sont passablement limitées. On peut retenir le principe selon lequel il s'agirait donc d'un « marché potentiel à l'export », avec des acteurs majeurs tels qu'Alstom ou Air Liquide, en remarquant toutefois que les principaux marchés géographiques visés à court terme (États-Unis, Chine) seront fortement concurrentiels et parfois protégés.

Analyse AFOM

Atouts

- La présence de grands groupes sur l'ensemble de la chaîne de valeur.
- Le soutien au développement de l'offre : appels à projet de l'ANR, appel à manifestation d'intérêt de l'Ademe.

Faiblesses

- Un marché domestique de taille modeste.
- Pas de retour sur investissement en l'état, en raison du prix du carbone trop faible.

Opportunités

- Un marché mondial en développement.

Menaces

- Un développement de la filière fortement conditionné par la mise en place d'une politique adaptée, notamment au niveau de l'Europe.

Recommandations

De façon générale, le développement d'une telle filière passera par la mise en place d'un cadre réglementaire propice à son développement au regard de l'importance des investissements et des coûts d'exploitation, un facteur clé étant le prix donné au carbone. Sur ces questions, le cadre de réflexion est, *a minima*, européen.

La France pourra probablement conforter sa position au travers de sa participation à de grands projets internationaux. Les projets de démonstration développés sur le territoire national auront surtout vocation à constituer une vitrine du savoir-faire français.

Liens avec d'autres technologies clés

8

53

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



47. Énergie nucléaire

Description

Pour la production d'électricité, l'énergie nucléaire peut être produite à partir de deux types de réactions : la fission (avec l'uranium comme combustible, principalement) et la fusion (à partir d'isotopes de l'hydrogène).

Les générations actuelles de réacteurs, dites générations II et III, reposent sur la fission à neutrons lents. Il s'agit de technologies relativement matures, les réacteurs de type EPR (dont le développement a commencé au début des années quatre-vingt-dix) en représentant une des versions les plus avancées. Alors que l'EPR est considéré comme une évolution de la génération précédente, la future génération IV (réacteurs à neutrons rapides) reposera sur un principe de fonctionnement différent, entraînant notamment l'utilisation de fluides caloporteurs autres que l'eau.

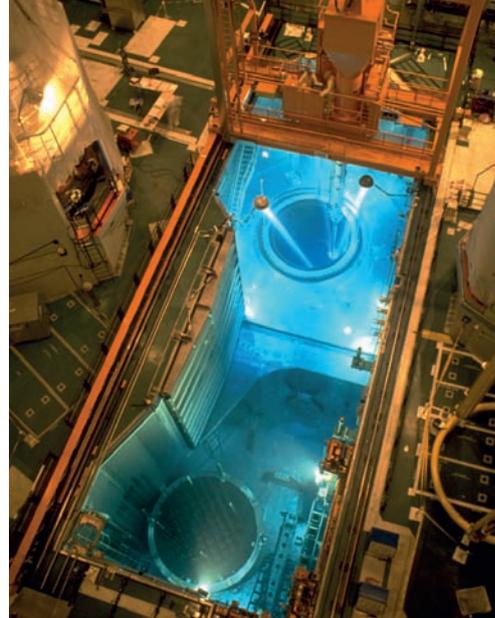
Quelle que soit la filière considérée, des besoins technologiques sont identifiés, dont les principaux sont :

- les outils de simulation numérique : ces outils sont indispensables au stade de la conception, mais ont aussi un rôle clé à jouer au niveau des études de sûreté ; ces outils doivent donc permettre de prédire le comportement de systèmes complexes en fonctionnement normal ou accidentel ;
- les matériaux : il s'agit en particulier de mettre au point de nouveaux matériaux (alliages métalliques, composites, revêtements céramiques...) adaptés aux futurs réacteurs à neutrons rapides et aux réacteurs à fusion. Ces matériaux seront soumis à des conditions extrêmes (irradiation, température) et leur vieillissement devra pouvoir être prédit avec suffisamment de précision ;
- l'instrumentation pour le contrôle, le pilotage et la sécurité des installations : l'objectif est d'élargir les possibilités de mesure et de traitement du signal. L'éventail est large : mesures chimiques, mécaniques, optiques, thermiques, neutroniques...

Certains besoins spécifiques concernent la fission, en particulier :

- l'amélioration du cycle du combustible, que ce soit au niveau de l'amont (extraction, conversion et enrichissement du combustible) ou de l'aval (traitement des combustibles irradiés) ;
- la maintenance et l'amélioration de la sûreté des réacteurs actuellement en service, en particulier dans la perspective de l'extension de leur durée de vie.

La fusion (ITER), quant à elle, s'inscrit dans un horizon à long terme (fin du XXI^e siècle), d'autant que la génération IV, si elle est mise en service, repoussera à très long terme le problème des ressources énergétiques. La fusion nécessitera néanmoins des investissements en R&D significatifs, en particulier dans le domaine de la physique des plasmas et de l'intégration des systèmes.



Applications

L'énergie nucléaire est bien adaptée à la production d'électricité en base, avec un impact limité du point de vue des émissions de CO₂.

En France, en 2008, le nucléaire représentait 76 % de la production d'électricité. Au niveau mondial, l'énergie nucléaire est présente dans 30 pays, et assure globalement 14 % de la production d'électricité. Le parc installé a connu une forte croissance dans les années soixante-dix et quatre-vingts, avant un net ralentissement à partir des années quatre-vingt-dix : la puissance installée représente actuellement 374 GW, contre environ 320 GW en 1990.

Fin 2010, on dénombrait 57 nouveaux réacteurs en cours de construction, dont 23 en Chine. Cela représentera une capacité additionnelle de 55 GW, soit l'équivalent de 14,6 % du parc actuel. Les programmes de construction les plus ambitieux se situent en Corée du Sud, en Chine, en Russie et en Inde ; des perspectives intéressantes existent aussi aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en Italie.

Enjeux et impacts

En France le premier enjeu est l'indépendance énergétique et la contribution majeure à la réduction du déficit de la balance commerciale ainsi que la fourniture d'énergie à un prix modéré. Le recours à l'énergie nucléaire est perçu comme une option possible dans le cadre de la lutte contre le changement climatique et pour répondre aux besoins croissants en électricité au niveau mondial. En France, les besoins se situent essentiellement au niveau de l'entretien et de la prolongation du parc actuel, ainsi qu'au niveau des nouvelles générations susceptibles de prendre le relais à long terme. Au niveau international, les programmes d'investissement annoncés ouvrent des perspectives aux filières industrielles, mais soulèvent également des inquiétudes relatives à la sûreté et aux risques de prolifération.

Par ailleurs, l'opinion publique française reste globalement en faveur du recours au nucléaire pour assurer la majorité de la production d'électricité (source : baromètre d'opinion sur l'énergie et le climat, CGDD) ; l'écart entre opinions favorables et opinions défavorables tend néanmoins à se réduire. Un des points de cristallisation des débats autour du nucléaire est la gestion des déchets

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

radioactifs ; à ce titre, des enseignements pourront être tirés des débats publics menés depuis plusieurs années autour du site expérimental de stockage souterrain de Bure-Saudron.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : Andra, CEA, IRSN...
- **Industrie** : Alstom, Areva, Bouygues, EDF, GDF-Suez, Vinci...
- **Pôles de compétitivité** : Pôle Nucléaire de Bourgogne ; Trimatec

Principaux acteurs étrangers

- GE-Hitachi, Mitsubishi Heavy Industries, Rosatom, Toshiba-Westinghouse...

Position de la France

Le programme électronucléaire des années quatre-vingts et quatre-vingt-dix a permis à la France de se positionner parmi les leaders mondiaux de l'énergie nucléaire. La filière française comporte plusieurs grands groupes et quelques centaines de PME, dont environ 200 spécialisées dans le domaine du nucléaire. La maintenance emploie à elle seule plus de 20 000 intervenants extérieurs.

Le soutien public à la recherche dans le domaine du nucléaire (fission et fusion) reste significatif : ces dépenses représentaient en 2008 environ la moitié du budget de R&D dédié à l'énergie. On peut également souligner qu'un volet du programme « investissements d'avenir » est dédié au « nucléaire de demain » ; il comporte trois priorités : le futur prototype de réacteur de quatrième génération ; le réacteur expérimental Jules Horowitz ; le traitement et le stockage des déchets.

La France reste donc un des acteurs majeurs de la recherche dans le domaine du nucléaire. Au niveau industriel, sa position a néanmoins pu être fragilisée par les retards pris sur les deux chantiers EPR en Europe (du fait de leur positionnement en tant que têtes de série), ainsi que par les difficultés rencontrées sur l'appel d'offres aux Émirats Arabes Unis. L'EPR reste néanmoins le réacteur de génération III dont la construction est la plus avancée (des chantiers en cours en Finlande, en France et en Chine) et il reste très bien positionné dans beaucoup de pays qui ont fait le choix de la relance du nucléaire (UK, USA, Italie, Inde et Pologne notamment). Par ailleurs, Areva travaille sur un projet de réacteur de moindre puissance, baptisé Atmea-1 (1 GW, contre 1,6 GW pour l'EPR), en partenariat avec le japonais Mitsubishi Heavy Industries.

Analyse AFOM

Atouts

- Un cumul d'expérience sans égal en matière d'exploitation de réacteurs et de gestion du cycle du combustible.
- L'importance de la filière industrielle (grands groupes et sous-traitants).
- La capacité de R&D.

Opportunités

- Les programmes d'investissement majeurs à l'international.

Menaces

- L'émergence de nouveaux concurrents (coréens, chinois).

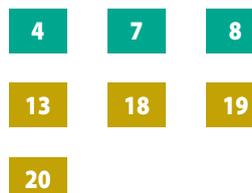
Recommandations

Les actions de recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire font l'objet d'une coordination (en particulier entre les organismes de recherche et les principaux acteurs industriels) qui s'est structurée au niveau national autour du programme Astrid, et qui s'opère aussi au niveau européen dans le cadre de la plateforme « Sustainable Nuclear Energy Technology ». Il faut par ailleurs souligner que les travaux de recherche représentant des enjeux majeurs à long terme (génération IV, projet Iter) font l'objet de coopérations au niveau mondial.

Les technologies du nucléaire ne sont toutefois pas l'apanage de groupes industriels internationaux et de grands organismes de recherche. Des besoins spécifiques existent, sur lesquels des PME peuvent se positionner (instrumentation, métiers de la maintenance... mais aussi, à l'avenir, démantèlement des réacteurs en fin de vie) ; un accompagnement peut toutefois s'avérer nécessaire, puisqu'aborder ces marchés requiert de bien intégrer et maîtriser les « référentiels » (normes, certifications...) propres au secteur nucléaire.

Il faut enfin souligner que le marché français du nucléaire est majoritairement celui de la maintenance ; de ce fait, les principales opportunités actuelles se situent au niveau international. Pour les PME de la filière, l'export représente donc un enjeu majeur, y compris, le cas échéant, en réponse aux demandes de concurrents des grands acteurs français. D'autres aspects (structuration de filière, normes...) dépassent le seul champ de l'analyse technologique.

Liens avec d'autres technologies clés



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



48. Solaire photovoltaïque

Description

La technologie photovoltaïque (PV) permet la conversion de l'énergie solaire en courant électrique. Les cellules photovoltaïques, des dispositifs semi-conducteurs, sont associés en modules d'une capacité de plusieurs centaines de W. Les modules sont eux-mêmes assemblés pour former des systèmes PV, intégrant un convertisseur courant continu-courant alternatif ou courant continu-courant continu, un régulateur et éventuellement un équipement de stockage de l'électricité. Les systèmes sont hautement modulaires, de quelques W à plusieurs MW, et peuvent être connectés au réseau.

Les cellules dites de deuxième et troisième générations sont appelées à succéder aux cellules à base de silicium massif :

- Les cellules de deuxième génération résultent du dépôt de la couche de semi-conducteur directement sur un substrat à moindre coût (verre, acier, acier flexible, films plastiques). La production de ce type de cellules permet d'éviter l'étape de transformation du silicium en tranche (« wafer »). Les cellules de deuxième génération permettent d'équiper de très grandes surfaces en les associant à un support souple (membrane), pour le bâtiment notamment, avec une rapidité de mise en œuvre élevée. On distingue le silicium amorphe (a-Si, non cristallin), le tellure de cadmium (CdTe) et le cuivre-indium-gallium-sélénium (CIGS). Les cellules à hétérojonction, notamment CdS-CdTe et CIS-CdS, sont d'un intérêt majeur.

- Les cellules de troisième génération rassemblent plusieurs concepts : la superposition de multiples cellules utilisant des bandes d'absorption différentes (cellules multi-jonctions), les cellules polymères et d'autres types de cellules organiques (matériau actif constitué d'un mélange polymère/fullerène). La troisième génération de cellules PV vise à dépasser les limites maximales de rendement des cellules actuelles.

Les couches minces représentent actuellement la solution technologique potentiellement à bas coût et basse efficacité tandis que les cellules PV de troisième génération offrent des perspectives de rendement élevé mais à coûts également élevés.

Des efforts sont nécessaires pour augmenter les performances des cellules, des modules et systèmes, les procédés industriels et la standardisation.

La réduction des coûts de fabrication reste une priorité pour la filière.

Applications

Les technologies PV sont employées sur une large gamme d'applications : pour les résidences, les commerces, pour l'industrie et les applications hors réseau de différentes dimensions. Les applications hors réseau offrent l'opportunité de pouvoir électrifier des zones à accès difficile. Les cellules de première génération, aux coûts et à l'efficacité moyens, représentent actuellement 90 % du marché. La technologie a-Si capte 90 % du marché actuel des cellules de deuxième génération.

En 2009, le volume de production mondiale de 7 GW de modules PV a été atteint. Le parc installé représentait près de 16 GW, à 70 % en Europe (Allemagne et Espagne). [source : European PV Industry Association] La croissance du parc devrait se poursuivre, soutenue par les plans de développement du secteur avec des tarifs d'achat de l'électricité produite. L'AIE PV Roadmap 2009 prévoit en 2030 une capacité mondiale d'environ 750 GW installée, toutes technologies confondues.

L'ensemble du marché PV en France a généré un chiffre d'affaires de 1,6 Md€ et la production d'électricité photovoltaïque s'est élevée à 0,16 TWh, (0,03 % de la production totale brute d'électricité) en 2009.

Afin d'intégrer et de gérer de larges quantités d'électricité photovoltaïque dans les réseaux, de développement sont en cours. En parallèle, l'autoconsommation de l'électricité produite est appelée à se développer fortement.

Enjeux et impacts

Le solaire photovoltaïque fait partie des filières susceptibles d'être mobilisées pour que la France puisse atteindre l'objectif fixé par la directive européenne 2009/28, c'est-à-dire une part de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation d'énergie finale brute, en 2020. La programmation pluriannuelle des investissements a notamment fixé un objectif de 5,4 GW de capacité de production d'électricité à partir de l'énergie solaire à l'horizon 2020.

Le recyclage des panneaux se développe, notamment ceux équipés de la technologie CdTe pour lesquels le cadmium, un métal toxique, doit être récupéré. Le photovoltaïque reste globalement bien perçu par les Français, d'autant plus que ce sont principalement des installations intégrées au bâtiment, et non des centrales avec de grandes emprises au sol. La multiplication récente des installations chez les particuliers a toutefois pu s'accompagner d'un certain nombre de contre-références, le développement de la filière semblant relever avant tout d'un effet d'aubaine.

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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



Liens avec d'autres technologies clés

51

52

75

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : Armines, CEA/Ines, InESS, ECPM, ICMCB, IES, IPCMS, Irdep, LPICM, LGEP, LPSC Meudon, LCS, Lamp, Simap
- **Industrie** : Appolon Solar, Solar Force, Nexcis, Solsia, EMIX, Photowatt, Tenesol, Arkema, EDF EN, Saint Gobain, Air Liquide, Total, GDF Suez
- **Pôles de compétitivité** : Alsace Energivie, Capenergies, Derbi, S2E2, Tenerrdis

Principaux acteurs étrangers

- First Solar, Suntech Power, Sharp, Q-Cells, Yingli Green Energy, J A Solar, Kyocera, Trina Solar, SunPower, Gintech

Position de la France

Au niveau mondial, l'industrie photovoltaïque française occupe une place modeste, les principaux producteurs étant américains et asiatiques, la production chinoise étant par ailleurs en forte progression. Pourtant la France possède des positions solides sur certains éléments hors panneaux, notamment le verre où les produits de Saint Gobain sont reconnus et utilisés mondialement.

Pour les première et deuxième génération, l'enjeu consiste à maintenir la filière française du solaire à niveau dans la compétition technologique mondiale, sur l'ensemble du cycle de production. Les opportunités pour les technologies françaises dépendent de la capacité de notre R&D à diminuer les coûts pour la première génération et à augmenter fortement les rendements pour la deuxième. Plusieurs projets de recherche structurants déjà lancés comme Solar Nano Crystal (CEA, Edfen et PV Alliance, Oséo-ISI, 170 M€ de budget), Solcis (Oséo ISI, 30 M€ de budget, CNRS, Nexcis), Cisel (financement Ademe, pilotage Irdep) et divers projets soutenus par le FUI visent à répondre à ces défis. Il s'agit de les mener à bien et d'en mesurer les jalons technologiques et d'en évaluer les impacts industriels en continu.

Les enjeux offensifs pour la France portent essentiellement sur la troisième génération, pour laquelle se développent notamment des projets pour le développement de cellules organiques (CNRS, CEA). Le projet Oséo/ISI Oscar (budget 20 M€ sur 2010-2014) mené par le groupe Armor, vise à développer des cellules photovoltaïques

organiques pour une production en 2015. Des ruptures sont également attendues dans le domaine de cellules à très haut rendement (multicouches et cellules photovoltaïques à concentration).

Analyse AFOM

Atouts

- Cinquième gisement solaire européen.
- Compétences technologiques dans les entreprises et centres de recherche.
- Compétences reconnues dans le photovoltaïque intégré au bâti.

Faiblesses

- Absence de « champion national ».

Opportunités

- Marché en forte croissance.
- Grands programmes internationaux, (Plan solaire Méditerranéen).

Menaces

- Avance technologique des acteurs américains et allemands.
- Risque de rupture d'approvisionnement (tellure pour les cellules CdTe et indium pour les cellules CIGS).
- Réduction d'un niveau de subventions au départ élevé.

Recommandations

Le principal enjeu pour la France, d'un point de vue technologique, consiste à pouvoir se positionner sur le photovoltaïque de troisième génération, domaine dans lequel le jeu est encore relativement ouvert. L'enjeu est d'autant plus significatif que les types de matériaux et les compétences mobilisés permettent d'autres types d'applications : éclairage, capteurs, électronique... avec des perspectives d'industrialisation à moyen terme.

Pour cela, il est nécessaire que la R&D française se positionne par rapport aux pôles en cours de constitution notamment au niveau européen (Dresde, Eindhoven) et développe ses coopérations avec les meilleurs d'entre eux. D'autres facteurs pourront par ailleurs contribuer au développement pérenne de la filière : renforcer la capacité des équipementiers à mettre en œuvre de nouveaux matériaux ; favoriser réglementairement l'intégration au bâti; assurer une visibilité suffisante sur les évolutions des tarifs d'achat de l'électricité d'origine photovoltaïque.

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



49. Énergie éolienne en mer

Description

Les éoliennes en mer utilisent le même principe que celles situées à terre : la force motrice du vent est collectée à travers des pales pour être convertie en électricité qui est exportée à terre par des câbles sous-marins. Elles sont groupées « en fermes d'éoliennes » de plusieurs dizaines de MW raccordées au réseau.

On distingue deux types de technologies en fonction du système de fixation :

- Les éoliennes « posées » sur le fond marin, qui reposent sur un amarrage gravitaire, une pile simple, double, par structure entretoisée (« jacket ») ou encore sur un tripode, jusqu'à 40 m de profondeur ;
- Les éoliennes flottantes, qui s'ancrent au fond marin au moyen de plusieurs systèmes : flotteur colonne à grand tirant d'eau (« spar »), flotteur semi-submergé et support à lignes tendues pour des installations loin des côtes à des profondeurs plus élevées (30 à 300 m).

Si les transferts technologiques entre l'éolien terrestre et l'éolien peu profond sont importants – les éoliennes en mer étant essentiellement dérivées des éoliennes terrestres de grande puissance, plusieurs MW, avec une protection améliorée à la corrosion – il existe une rupture technologique pour aller vers l'éolien offshore flottant. Les machines flottantes élargissent les zones potentielles de développement de parcs dans de nombreux pays comme en France.

Une industrie complète spécialisée pour l'« offshore » est en cours de constitution, notamment en Europe.

Les turbines éoliennes en mer peuvent bénéficier de vents plus forts et moins turbulents que sur terre et limiter l'impact visuel. Les sévères conditions marines appellent le développement de systèmes très fiables et plusieurs nouveaux concepts de turbines en mer sont en cours de tests. Les principaux verrous visent à :

- développer une nouvelle génération de turbines et de structures marines spécialement conçues pour un environnement marin avec des besoins d'opération et de maintenance réduits ;
- abaisser le coût des installations avec moins de 40 m de fond et améliorer la stratégie d'installation et de la chaîne d'approvisionnement ;
- améliorer la capture d'énergie par le rotor, particulièrement à basses vitesses, dans des conditions turbulentes ;
- augmenter les temps d'opérations des fermes en mer ;
- réduire les coûts d'opération et de maintenance ;
- allonger la durée de vie des turbines et réduire le coût de composants ;

- améliorer les technologies de transmission ;
- évaluer les interférences avec le contrôle de la navigation maritime et aérienne.

Applications

La technologie éolienne en mer vise à produire de l'électricité d'origine renouvelable. Le parc d'éoliennes en mer était d'environ 800 turbines raccordées au réseau, totalisant une puissance de 2 GW, essentiellement en Europe, notamment en Allemagne et au Royaume-Uni, en augmentation de 54 % [source : European Wind Energy Association EWEA]. En 2010, près de 1 GW de capacité devrait être installé pour un chiffre d'affaires de 3 Md€. Les plus grands prototypes industriels atteignent 10 MW et des diamètres de 145 m.

Même soutenue par une forte croissance, la part des éoliennes en mer restera inférieure à celle des éoliennes terrestres. En 2050, les deux tiers environ de l'électricité d'origine éolienne devraient toujours provenir d'éoliennes terrestres.

À cette date, les principaux marchés seront dans l'ordre, la Chine, l'Europe et les États-Unis.

Les coûts d'investissements devraient évoluer vers une réduction estimée à 38 % en 2050 : ils passeraient de 3 000 - 3 700 \$/kW en 2010 à 2 100 - 2 600 \$/kW.

Enjeux et impacts

L'éolien offshore fait partie des filières susceptibles d'être mobilisées pour que la France puisse atteindre l'objectif fixé par la directive européenne 2009/28, c'est-à-dire une part de 23 % d'énergie produite à partir de sources renouvelables dans la consommation d'énergie finale brute, en 2020, contre 10,3 % en 2005.

Un premier appel d'offre pour 500 MW d'éolien offshore a été lancé en France. Le plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale proposé dans le cadre du Grenelle de l'environnement prévoit que 1 GW de capacité d'éolien en mer serait à installer d'ici à 2012 et 6 GW d'ici à 2020, sur 25 GW d'énergie éolienne. Un appel d'offre de 3 GW est en préparation pour implanter au large des côtes françaises, environ 600 éoliennes, à partir de 2015.

À l'instar de ce qui s'est produit avec l'éolien terrestre, les projets d'éoliennes en mer peuvent rencontrer de fortes oppositions locales (marins pêcheurs, riverains, professionnels du tourisme...), se traduisant parfois par des recours en justice.

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

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : IFP Énergies nouvelles, Ifremer
- **Industrie** : Alstom, Areva, DCNS, EDF EN, GDF-Suez, Leroy Somer, Nass & Wind, Nexans, Poweo, Rolix, Saipem, Technip, Vinci
- **Pôles de compétitivité** : Pôle Mer Bretagne, Pôle Mer PACA

Principaux acteurs étrangers

- Acciona, Gamesa, GE Wind, Nordex, Siemens, RE Power, Statkraft, Suzlon, Vestas

Position de la France

La filière française de l'industrie éolienne ne s'est pas développée de façon significative, et le développement de l'éolien en mer ne pourra donc pas ou peu s'appuyer sur celle-ci.

Ce point n'est pas forcément critique dans le cas des éoliennes flottantes qui représentent une opportunité importante pour la filière française. Les technologies sont notablement différentes de celles mises en œuvre dans le domaine de l'éolien terrestre et s'apparentent à l'offshore pétrolier. Par ailleurs, la France possède les compétences en conception et développement pour développer la filière et grâce à sa façade maritime, elle dispose d'un des premiers potentiels européens.

Analyse AFOM

Atouts

- Gisement éolien offshore significatif.
- Présence de grands groupes dans les activités prépondérantes de la filière : construction des fondations, raccordements au réseau électrique, installation, exploitation et maintenance.

Faiblesses

- Faiblesse de la filière de l'éolien en général.

Opportunités

- Lancement des premiers projets à l'échelle industrielle.
- Appels d'offres nationaux et internationaux.

Menaces

- Intensité concurrentielle forte, en particulier au niveau européen (projet Seatec en mer du Nord et en mer Baltique).
- Conflits d'usage sur les zones maritimes.



Liens avec d'autres technologies clés

7

11

43

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

Recommandations

Il apparaît tout d'abord essentiel de renforcer l'offre française sur l'ensemble de la chaîne de valeur, notamment sur les composants.

Les principaux besoins de développements technologiques concernent l'éolien offshore flottant, lequel ne peut bénéficier que de transferts très limités de technologies issues de la filière de l'éolien terrestre. En revanche, l'expérience acquise dans le cadre du développement de cette dernière a montré la nécessité d'outils de concertation avec les parties prenantes de chaque projet afin de prendre en compte les différents aspects relatifs aux dimensions sociales.



50. Géothermie

Description

Les technologies d'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol visent deux utilisations principales : la production de chaleur et la production d'électricité. On distingue plusieurs filières :

- géothermie très basse énergie avec une température inférieure à 30°C (nappes d'une profondeur inférieure à 300 m et eau de mer). La chaleur extraite est utilisée pour assurer le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le rafraîchissement des locaux au moyen d'une pompe à chaleur géothermique, cette dernière transférant les calories ;
- géothermie basse énergie ou basse enthalpie : température entre 30 et 90° C (ressources à une profondeur d'environ 1 000 m) pour l'alimentation des réseaux de chaleur urbains par échangeur de chaleur, le chauffage des serres, le séchage de produits, le thermalisme ;
- géothermie moyenne enthalpie : température comprise entre 90 et 150° C (gisements d'eau chaude ou de vapeur humide dans des bassins sédimentaires de 2 000 à 4 000 m de profondeur) pour laquelle la chaleur est valorisée notamment dans des procédés industriels et éventuellement pour produire de l'électricité par cycle binaire où un échangeur transmet la chaleur de la nappe à un fluide de type isobutane, isopentane, ammoniac, qui présente la propriété de se vaporiser à une température inférieure à celle de l'eau ;
- géothermie haute température ou haute enthalpie : température supérieure à 150° C (réservoirs localisés entre 1 500 et 3 000 m de profondeur, généralement dans les zones de volcanisme ou de tectonique active) pour la production d'électricité à l'aide de turbines.

L'eau peut être évacuée en surface si elle est initialement peu chargée en sel dissous ou bien réinjectée, doublet géothermique. Ces technologies sont assez mûres pour pouvoir être déployées en fonction des caractéristiques des sites et de la nature de la demande en énergie (puissance appelée, température nécessaire). De nouveaux développements sont attendus en ce qui concerne :

- pompes à chaleur géothermiques : amélioration de la connaissance des formations superficielles, développement de la connaissance des performances et de l'impact sur les milieux des différents types d'échangeurs souterrains, optimisation des techniques de forage et réduction de leur coût et impact, conception des systèmes ;
- réseaux de chaleur : la recherche et la démonstration sur le thème du stockage d'énergie intersaisonnier en aquifère profond et l'intégration des réseaux de chaleur basse température dans le bâtiment ;
- tenue à la corrosion ;

- étude des impacts sur l'environnement marin des rejets d'eau de mer à température différente du milieu ;
- amélioration de l'évaluation des ressources, de l'exploration et des méthodes d'exploitation notamment dans les DOM.

Une nouvelle filière en cours de développement repose sur la géothermie profonde assistée (EGS). La chaleur est extraite des roches chaudes fissurées entre 3 000 et 5 000 m de profondeur en stimulant les roches peu perméables par injection d'eau sous forte pression dans le sol. Plusieurs sites pilotes sont installés (France, Allemagne, Suisse, Australie).

Applications

La puissance mondiale installée pour la production de chaleur est estimée à 27 000 MW, correspondant à une production annuelle supérieure à 70 000 MWh [source : BRGM] en augmentation. La capacité de production d'électricité s'élève à 10 000 MW en 2007 [source : BRGM], soit 0,3 % de la puissance mondiale électrique installée. Les principaux pays producteurs se situent sur la périphérie du Pacifique sur le continent américain, en Asie et en Océanie.

En France, 16,6 MW de puissance sont installés, (15 MW à Bouillante en Guadeloupe). Dans les DOM insulaires, le contexte volcanique et une volonté politique d'aller vers l'autonomie énergétique ouvrent la perspective de dépasser les 120 MW à l'horizon 2015. En France métropolitaine, de larges bassins sédimentaires avec des couches géologiques renfermant des aquifères sont exploitables (Bassin parisien et Bassin aquitain, Alsace).

La technologie EGS offre des perspectives sur le plus long terme et à une échelle géographique plus étendue, en permettant de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur, et ce sur une grande partie du globe. Les premières applications commerciales sont attendues d'ici à 2020.

Enjeux et impacts

Les emplois liés à la fabrication et à la commercialisation des équipements pour les pompes à chaleur, leur installation et leur maintenance sont estimés à 5 000 en 2007 et à 20 000 en 2012. [source : CGDD, *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*].

En nombre de MWh produits, la géothermie constitue, avec la biomasse et l'éolien, l'une des principales sources d'électricité renouvelable dans le monde après l'hydroélectricité.

En matière de production d'électricité, la géothermie profonde est identifiée comme un élément clé de l'autonomie énergétique des territoires. Les DOM et COM, du

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

fait d'un positionnement géographique et géologique exceptionnels, représentent un potentiel valorisable pour développer une position de leader.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Recherche** : BRGM, CSTB, IPG Paris
- **Industrie** : AJ Tech, CFG Services, DFM-Sofath (De Dietrich), EDF, France Géothermie, Giordano Industries, Veolia/Dalkia
- **Pôles de compétitivité** : Avenia, Capenergies, Pôle Dream Eau & Milieux

Principaux acteurs étrangers

- Chevron, ENEL, Halliburton, Nevada Geo Power, Ormat, Star Energy

Position de la France

La France occupe une bonne position dans le domaine de la géothermie, ceci étant à relativiser en fonction des technologies :

- géothermie haute enthalpie : la France est relativement en retard, les pays en tête sont l'Islande, l'Italie, la Nouvelle-Zélande, les États-Unis et l'Indonésie ;
- géothermie basse enthalpie : la France a une expérience historique (Bassin parisien notamment) à mieux exploiter sur le marché domestique et international ;
- géothermie très basse température : la France est en retrait par rapport à des pays très volontaires comme la Suède ou la Suisse. Il n'existe pas d'offre d'opérateur structurée mais une offre portée par les fabricants de pompes à chaleur. La France a développé une expertise reconnue sur la technique du doublet pour l'exploitation de nappes chargées en sels minéraux et nécessitant un forage de réinjection.

Analyse AFOM

Atouts

- Cumul d'expérience en géothermie basse enthalpie.
- Technologie proche de l'équilibre du marché pour la production de chaud et froid pour le secteur tertiaire.

Faiblesses

- Technologies qui restent globalement complexes à mettre en œuvre (hors pompes à chaleur géothermique).
- Absence d'acteurs français d'envergure internationale.

Opportunités

- Potentiel de développement de la géothermie profonde.

Menaces

- Risque de domination des constructeurs étrangers de pompe à chaleur.

Recommandations

Si la France possède un cumul d'expérience significatif dans le domaine de la géothermie, elle n'a pas su valoriser de façon notable ses compétences à l'international. Certaines d'entre elles, comme le développement de réseaux de chaleur couplés à la géothermie, ou la production d'électricité dans les zones insulaires volcaniques, pourraient toutefois permettre à la France de se positionner parmi les leaders mondiaux.

À ce titre, les installations exemplaires existantes (telles que la centrale de Bouillante) pourraient permettre la création de centres d'ingénierie d'excellence à vocation internationale. Les approches pluridisciplinaires (corrosion, géosciences...) doivent par ailleurs être privilégiées.

Liens avec d'autres technologies clés

7

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



51. Stockage stationnaire d'électricité

Description

Les principales technologies de stockage stationnaire de l'énergie électrique se répartissent en fonction de la capacité des systèmes :

- le stockage électrique à très grande échelle, aussi appelé stockage d'électricité de masse (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de MWh de capacités de production) comprend les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) et celles qui fonctionnent par compression d'air (ou « CAES » lorsque la chaleur de compression n'est pas récupérée ou « AA-CAES » lorsqu'il y a récupération) ;
- le stockage à grande échelle (plusieurs MWh à plusieurs dizaines de MWh de capacités), comprend les accumulateurs électrochimiques au plomb et au nickel-cadmium, l'électrochimie à circulation, et le stockage de chaleur haute température (thermique) avec réfractaire et turbine ;
- le stockage à moyenne échelle (quelques kWh au MWh)/à petite échelle (plusieurs Wh à plusieurs kWh), qui se différencient par les services offerts, et leur caractère embarqué-stationnaire. Elles incluent les supercondensateurs, les accumulateurs électrochimiques (plomb-acide, lithium, métal-air, sodium-soufre, etc.), les volants d'inertie, l'air comprimé en bouteilles, l'hydrogène associé à une pile à combustible, et les supraconducteurs.

L'énergie est stockée sous forme indirecte : une conversion intermédiaire est nécessaire avant utilisation à l'exception des supercondensateurs (stockage direct sous forme électrostatique) et des supraconducteurs (stockage sous forme magnétique).

Les capacités de décharge sont comprises entre la fraction de seconde pour les applications de haute puissance (alimentation ininterrompue) et quelques minutes pour la stabilité du réseau. Elles peuvent atteindre plusieurs heures pour les applications de grande capacité (équilibre offre demande, etc.).

Les STEP et CAES sont déployés industriellement, tandis que la plupart des autres technologies de stockage de masse sont encore au stade du prototype (électrochimie à circulation) ou d'études (AA-CAES, ...).

Les priorités de recherche et développement portent sur :

- la mise en place d'une approche système : développement de modèles physiques, mise au point de logiciels de simulation, étude de fortes pénétrations du stockage diffus ;
- l'amélioration des performances et la baisse des coûts des accumulateurs électrochimiques (procédés de fabrication, maintenance, éco-conception et recyclage) ;
- la diversification des technologies : AA-CAES en com-

plément des STEP, volants d'inertie pour les applications décentralisées.

Applications

Les technologies de stockage sont destinées aux applications stationnaires qui visent à sécuriser les approvisionnements en électricité, optimiser la gestion du réseau électrique (plans de fréquence et de tension), lisser la courbe de charge, augmenter la pénétration des sources intermittentes renouvelables (éolien et solaire thermique et photovoltaïque) et réduire les besoins en centrales thermiques d'appoint.

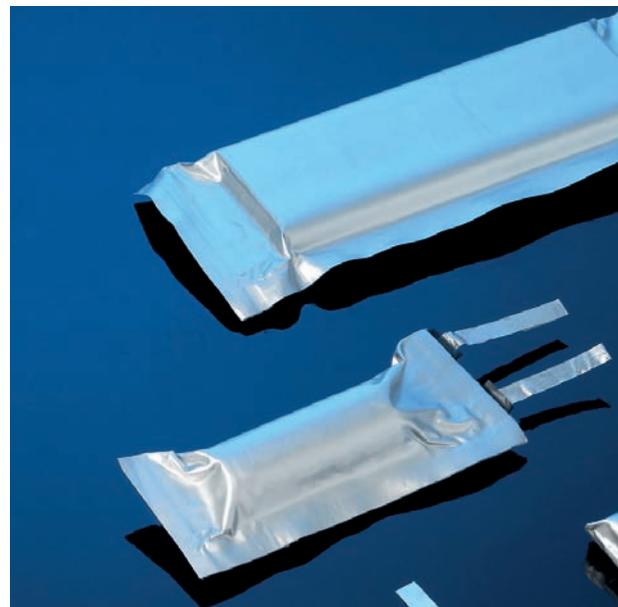
La capacité mondiale en 2009 de stockage d'énergie électrique est d'environ 100 GW [source : AIE], du fait principalement de la mise en œuvre de la technologie des STEP (350 sites). Cette capacité devrait s'élever à 189 GW en 2050 (source : AIE) couplée au développement des réseaux électriques intelligents.

Le marché du stockage de moyenne et petite échelle est dominé par les accumulateurs électrochimiques, essentiellement pour des raisons de coûts et de disponibilité des technologies.

Enjeux et impacts

Le développement des technologies de stockage est une réponse à la nécessité d'améliorer la disponibilité et la qualité de l'alimentation en électricité. Il permettrait également de faire face aux impératifs du développement durable du Grenelle.

Il s'agit alors de s'assurer du bon fonctionnement des réseaux compte tenu de ces évolutions, en prenant en compte le fait que les solutions de stockage d'électri-



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

citée actuellement mises en œuvre ne trouvent pas leur équilibre économique dans la seule rémunération des services systèmes et dans leur valorisation sur le marché dérégulé : l'amélioration de leur modèle économique passe aussi par la réduction des coûts pour l'industrie du stockage.

Acteurs

Principaux acteurs français

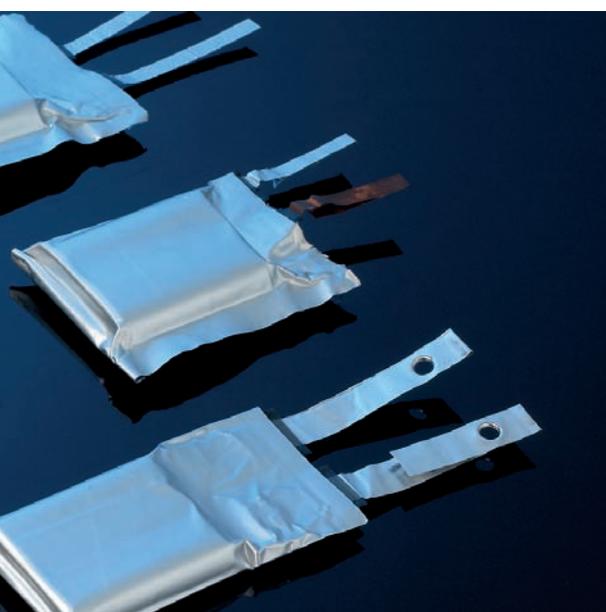
- **Recherche** : BRGM, CEA/Ines, Cirimat, CNRS/IMN, CNRS/LRCS Amiens, ICMCB, IFP Énergies nouvelles, Laboratoire Laplace (Toulouse)
 - **Industrie** : Areva, Batscap, EDF, EnerSYS, GDF-Suez, Mc Phy, Recupyl, SAFT, SAIPEM, Saint Gobain, Total
- Pôles de compétitivité : Avenia, Capenergies

Principaux acteurs étrangers

- Alabama Electric Corp, C&D, East Penn, EnBW, E.ON, Exide, Firefly, Furukawa, General Electric, Maxwell, Panasonic, RWE Power, Samsung SDI, Siemens, Züblin

Position de la France

La France détient une position très concurrentielle dans le domaine du stockage d'énergies. Le tissu industriel national est dominé par les STEP exploités de longue date par EDF production, et Alstom détient 25 % du marché mondial des turbo-machines. SAFT ou Batscap sur les technologies électrochimiques réalisent leur production et une partie de leur recherche en France. Certaines



PME sont par ailleurs très actives sur des produits innovants (volants d'inertie, recyclage des matériaux d'électrodes, etc.).

La France dispose de laboratoires publics de premier plan au niveau mondial dans le domaine du stockage électrochimique. Elle possède également un savoir-faire technologique reconnu dans l'électronique de puissance, les systèmes de charge, etc.

Analyse AFOM

Atouts

- Dimension sociale.
- Multiplicité des techniques disponibles et des services pouvant être proposés aux réseaux électriques.

Faiblesses

- Coûts d'investissements élevés (moins pour les stockages de masse).
- Grande sensibilité du modèle économique aux variations des écarts de prix heures creuses-heures pleines pour les stockages de masse et aux tarifs d'accès.

Opportunités

- Développement des réseaux électriques intelligents et de la part des énergies renouvelables intermittentes dans le mix énergétique.
- Nécessité pour les opérateurs de réseaux publics d'électricité d'optimiser les investissements et d'accroître la sécurité de leurs réseaux.

Menaces

- Réglementation contraignantes (lois sur l'eau par exemple pour les STEP).
- Tarifs d'accès aux réseaux électriques pénalisants pour les installations de stockage d'électricité de masse.

Recommandations

Face à la concurrence internationale, il est essentiel de maintenir un niveau de recherche de haut niveau et soutenir les transferts vers l'industrie, d'accroître la demande et de stimuler le stockage décentralisé d'énergie ainsi que de :

- aménager des tarifs d'utilisation des réseaux électriques ;
- alléger les contraintes réglementaires pour la mise en œuvre de stockage de masse (STEP et AA-CAES) ;
- créer des mécanismes de soutien adaptés à chaque filière ;
- élaborer une directive stockage d'énergies avec les partenaires européens ;
- réaliser des opérations de démonstration pour les stockages de nouvelles générations (AA-CAES, batteries, volants...).

Liens avec d'autres technologies clés

7

42

44

52

63

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



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 CO₂ 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 CO₂, par la gestion et le retraitement des gaz résiduels, de l'eau, du SO₂ ;
- 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

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.

Liens avec d'autres technologies clés

46

56

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

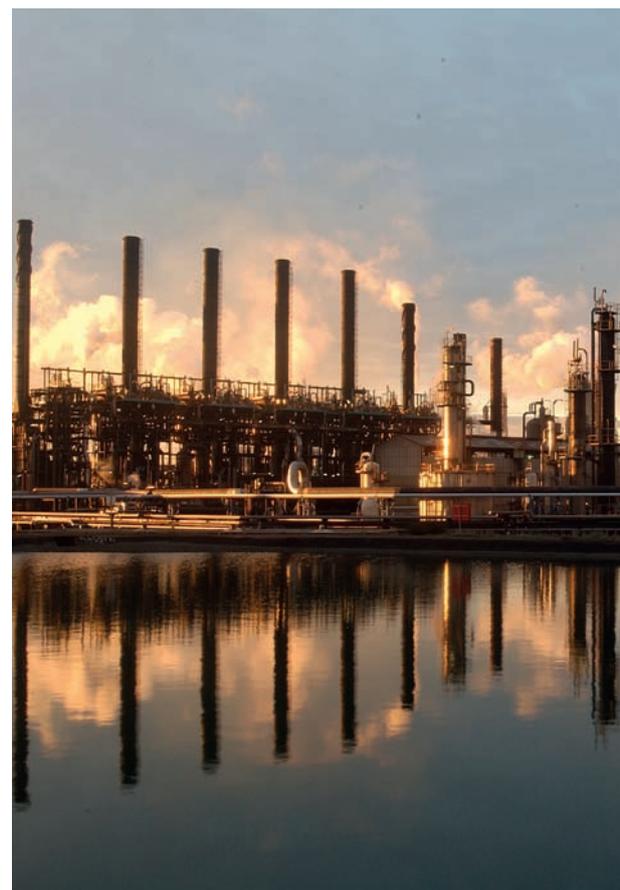
demande de produits raffinés devrait continuer à augmenter, mais les capacités de raffinage dans le monde sont supérieures à la demande mondiale et devraient le rester, si l'on intègre les projets en cours à moyen terme. Une restructuration du secteur est attendue en Europe et aux États-Unis avec une 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 SO₂, NOx, CO, etc. et globale pour le CO₂ 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 CO₂ repose largement sur l'amélioration de l'efficacité dans l'emploi des hydrocarbures. Les émissions de CO₂ 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)

●	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





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 cuivre¹⁷, 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

<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

- 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)

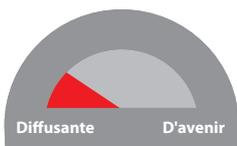
<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

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 (H₂ + CO). Il est ensuite purifié et transformé en hydrocarbures liquides (C_xH_y) 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 CO₂ est également un axe de recherche : environ une tonne de CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂, le bilan du puits à la roue du CtL est [source AIE] :

- 560 g de CO₂éq/km sans captage et séquestration du CO₂, soit environ le double du diesel ;
- 300 g de CO₂éq/km avec captage et séquestration du CO₂.

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, Schmack 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

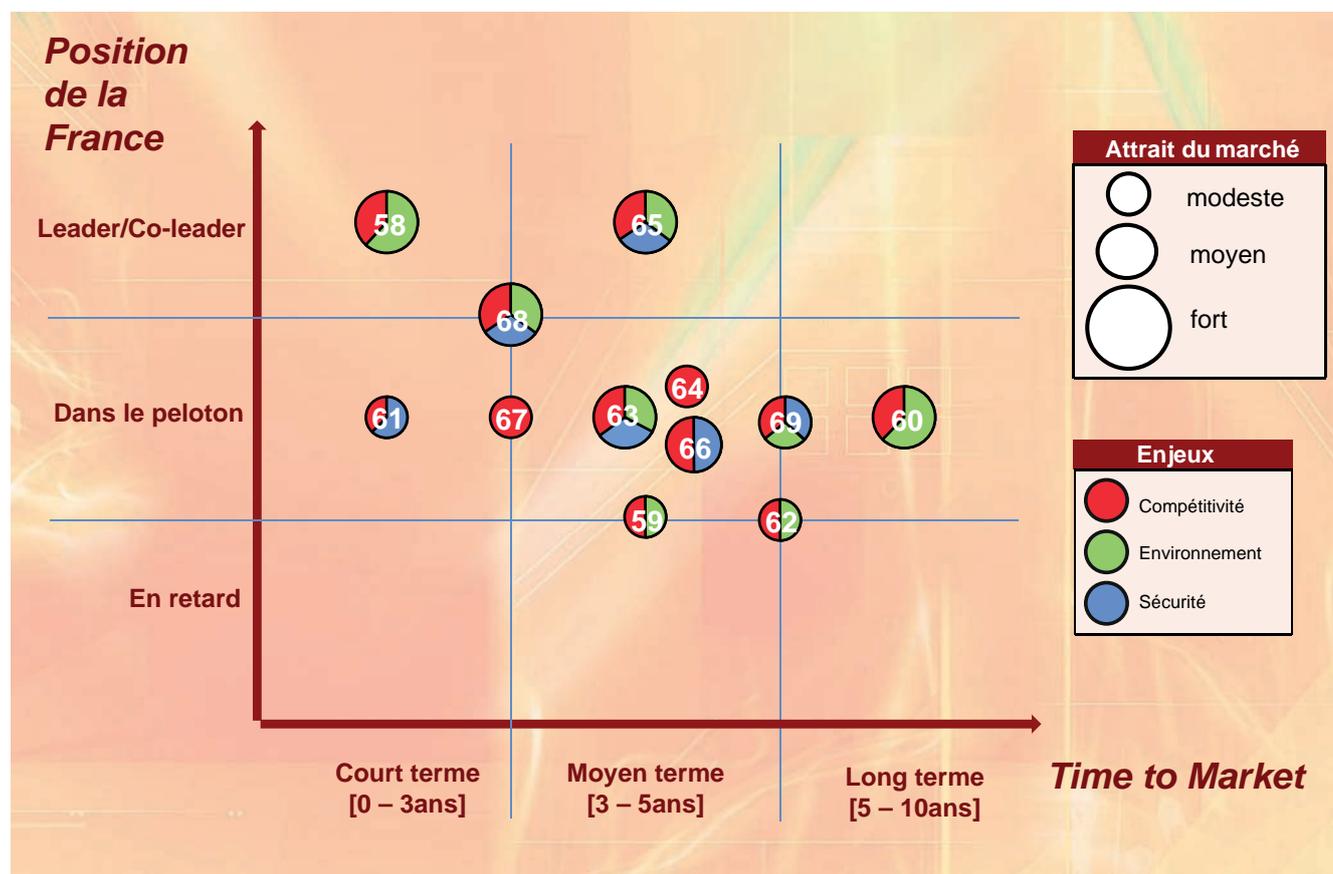
- Agence internationale de l'énergie, *Energy Technology Perspectives*, 2010
- Bulletin de diffusion de l'Agence internationale de l'énergie, *ETSAP - Technology brief*, 2010. www.etsap.org
- Commissariat général au développement durable, *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, 2010. www.developpement-durable.gouv.fr
- EurObserv'ER, *État des énergies renouvelables en Europe*, 2010. www.energies-renouvelables.org
- Rapport du MEDEF, *Nouvelles énergies, nouvelles technologies*, 2010. 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
- 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
- Rapport de synthèse DGEC, *Scénario énergétique de référence DGEMP-OE*, 2008. 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
- Feuille de route des énergies renouvelables de l'European Renewable Energy Council, *20% pour 2020*, 2008. 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
- 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^e génération*, 2010. www.ademe.fr
- Appel à projet de l'ANR, *Programme bioénergies*, 2010. www.agence-nationale-recherche.fr
- Rapport de l'Agence internationale de l'énergie, *Sustainable production of second-generation biofuels*, 2009. www.iea.org
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Concentrating solar power*, 2010. www.iea.org
- Feuille de route de l'Ademe, *Énergies renouvelables marines*, 2010. www.ademe.fr
- Feuille de route de l'European Ocean Energy Association, *European ocean energy roadmap 2010-2050*, 2010. www.eu-oea.com
- Feuille de route de l'Ademe, *Captage, transport et stockage géologique du CO₂*, 2010. 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
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Carbon capture and storage*, 2009. www.iea.org
- Rapport de la Commission européenne : *SNETP - Strategic Research Agenda*, 2009. ec.europa.eu/research/energy
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie, *Solar photovoltaic energy*, 2009. www.iea.org
- Étude de l'EPIA, *Global market outlook for photovoltaic until 2014*, 2010. www.epia.org
- Étude *The European offshore wind industry - key trends and statistics 2009*, 2010. www.ewea.org
- Feuille de route de l'Agence internationale de l'énergie *Wind energy*, 2009. www.iea.org
- Rapport du Carbon Trust, *Offshore wind power : bid challenge, big opportunity*, 2010. 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
- Présentation du BRGM, *France 2025 - diagnostic stratégique : ressources rares et environnement*, www.brgm.fr
- Étude de Geothermal Energy Association, *Geothermal energy : international market update*, 2010. 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
- 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
- Rapport du MEEDDM, *L'industrie pétrolière et gazière en 2009*, 2010. www.developpement-durable.gouv.fr
- Rapport de l'IFP Énergies nouvelles, *Les investissements en exploration-production et raffinage*, 2009. www.ifp.fr
- Communication de l'UFIP, *Les mutations du raffinage français*, 2010. www.ufip.fr
- Actes de colloque Agence internationale de l'énergie/CIAB : *Coal-to-liquids - an alternative oil supply ?* 2006. www.iea.org

Trainsports



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.

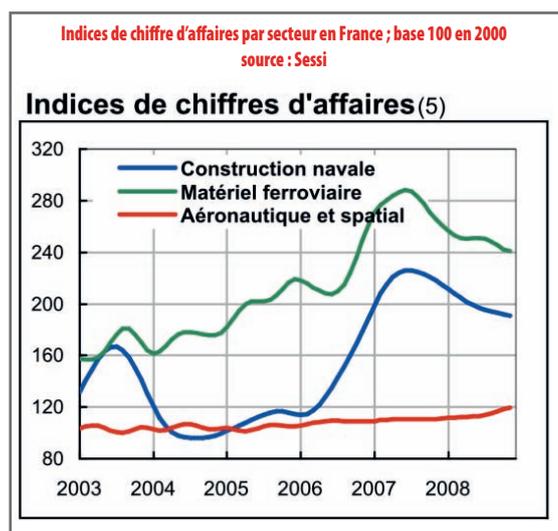
Enfin, le marché mondial des services de maintenance aéronautique était estimé en 2008 à 120 Mds\$ [5.38].



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.

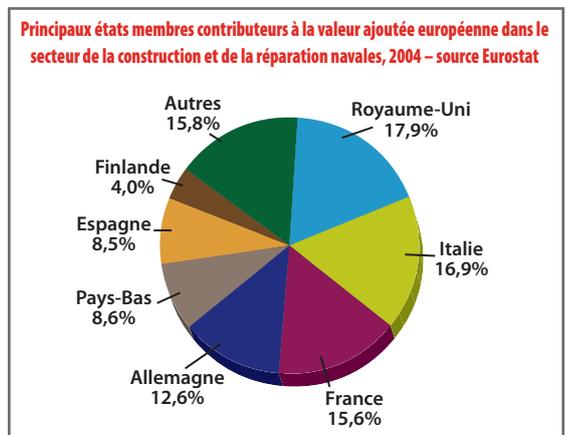


Le paysage industriel français est structuré autour de quelques grands constructeurs français (Alstom) ou étrangers (Bombardier, Siemens transportation), et d'équipementiers (Faiveley, Neotec...).
Les opérateurs de transport français tels la SNCF ou Veolia prennent des positions à l'international sur 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^{er} janvier 2010, en forte hausse par rapport à début 2009.
L'industrie du nautisme (plaisance) est une des premières dans le monde. La filière en France (y compris loueurs, ports de plaisance...) représente quelque 45 000 salariés dans 5 000 entreprises, pour un chiffre d'affaires de 5 Mds€ [5.32].

Le transport et la logistique

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

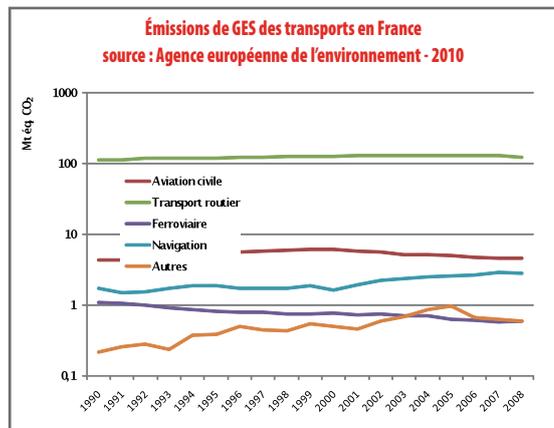
Le transport représente 46 % des emplois de la filière transports et logistique qui totalisait en 2006 1,6 million d'emplois [5.6].

Enjeux transversaux

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

Des enjeux environnementaux partagés

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



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

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

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

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

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

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

Les BRIC, inducteurs de changements

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

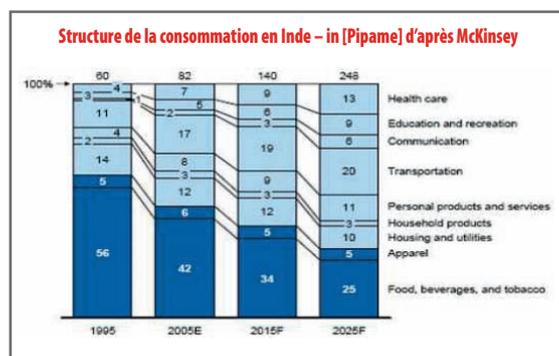
- les coûts de main d'œuvre ont provoqué depuis de nombreuses années et continuent à induire dans l'industrie des transports, en particulier automobile, des délocalisations nombreuses, notamment pour la fabrication des petits véhicules sur lesquels les marges sont les plus faibles. Ces délocalisations,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

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

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

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

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



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

Qualité de conception

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

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

La normalisation

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

Les congestions

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

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

L'accessibilité

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

Enjeux spécifiques

La sécurité routière

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



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

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

La diminution des coûts d'exploitation

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

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

Limiter les ruptures de charge

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

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

Les grandes tendances d'évolution du secteur

La hausse du prix du pétrole

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

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

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

Urbanisation et évolution de la mobilité

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

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

L'intermodalité et la multimodalité

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

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

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

L'évolution des modèles économiques

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

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

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

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

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

Des temps de transport productifs

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

Les tendances technologiques et les technologies clés

L'allègement des véhicules

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

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

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

Voir fiche :

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

L'amélioration des moteurs thermiques et des carburants

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

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

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

Voir fiches :

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

L'électrification des véhicules

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

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



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

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

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

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

Voir fiches :

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

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

La surveillance en continu et l'échange de données

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

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

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

Voir fiche :

- 66. Communications et données.

Méthodes et processus

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

- co-conception ou conception collaborative entre plusieurs acteurs ;

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

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

Voir fiches :

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

Optimisation des chaînes de transport

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

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

Voir fiche :

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

Analyse de la position de la France

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Recommandations

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

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

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

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

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

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

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

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

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



58. Moteurs à combustion interne

Description

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

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

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

Et plus spécifiquement :

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

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

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

fin du moteur par un calculateur.

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

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

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

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

Applications

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

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

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

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

Enjeux et impacts

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

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

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

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

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

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

Acteurs

Principaux acteurs français

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

Position de la France

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



Analyse AFOM

Atouts

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

Faiblesses

Concurrence interne pouvant disperser les efforts.

Opportunités

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

Menaces

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

Recommandations

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

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

Liens avec d'autres technologies clés

41

56

65

68

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



59. Moteurs électriques

Description

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

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

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

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

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

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

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

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

VÉHICULE ÉLECTRIQUE : LES ORGANES SPÉCIFIQUES
ELECTRIC VEHICLE: CHARACTERISTIC COMPONENTS



Applications

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

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

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

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

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

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

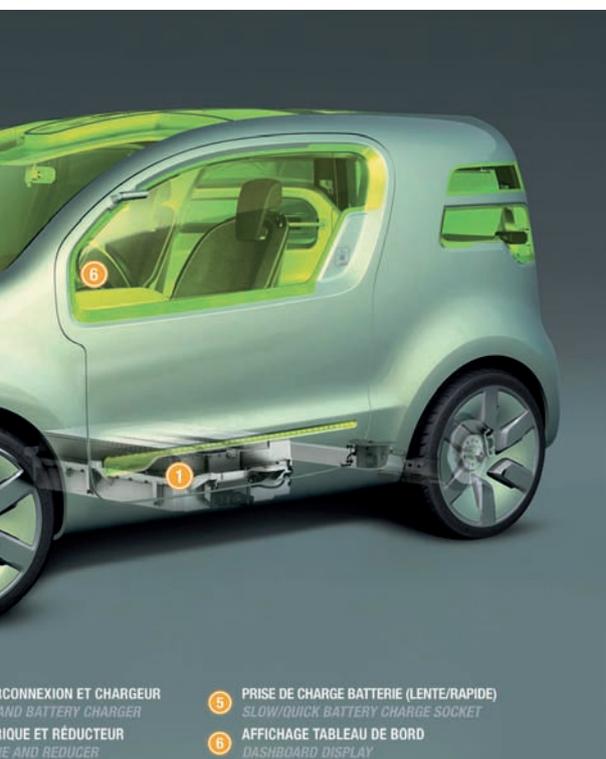
Enfin, les moteurs électriques de fortes puissances équipent déjà depuis un certain temps le secteur naval. Les grands navires sont en effet propulsés par des systèmes hybrides diesel-électriques. Les moteurs électriques sont de plus en plus intégrés dans des pods, nacelles orienta-

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



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

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

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

Enjeux et impacts

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

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

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

Acteurs

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

Position de la France

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

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

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

Analyse AFOM

Atouts

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

Faiblesses

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

Opportunités

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

Menaces

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

Recommandations

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

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

Liens avec d'autres technologies clés

63

64

65

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



60. Nouvelles technologies de turbomachine



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

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

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

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

Applications

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

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

Description

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

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

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

Ainsi les turbomachines sont des dispositifs d'une grande

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

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

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

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

Enjeux et impacts

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

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

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

Acteurs

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

Position de la France

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

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

Analyse AFOM

Atouts

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

Faiblesses

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

Opportunités

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

Menaces

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

Recommandations

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

Liens avec d'autres technologies clés

41

56

65

68

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



61. Interaction homme-machine, ergonomie

Description

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

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

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

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

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

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

Applications

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

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

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

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

Enjeux et impacts

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

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

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

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

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



Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

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

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

Acteurs

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

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

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

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

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

Position de la France

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

Analyse AFOM

Atouts

Présence de compétences fortes chez les grands systémiers.

Existence d'un écosystème académique sur la question.

Faiblesses

Faible diffusion de la compétence et de la connaissance.

Opportunités

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

Recommandations

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

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

Liens avec d'autres technologies clés

17

18

66



Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



62. Optimisation de la chaîne logistique

Description

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

Applications

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

Elle comprend notamment :

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

Enjeux et impacts

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

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

Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion
● Diffusion croissante
● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion
● Diffusion croissante
● Généralisation



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

Acteurs

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

Position de la France

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

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

Analyse AFOM

Atouts

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

Faiblesses

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

Opportunités

Amélioration de la compétitivité.

Menaces

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

Recommandations

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

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

Liens avec d'autres technologies clés

16

21

28

29

66

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



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

Définitions

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

Description

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

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

Les travaux de développement visent à :

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

Les verrous portent ainsi sur des questions liées :

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

Applications

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

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

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

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

Enjeux et impacts

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

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

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

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

Acteurs

Principaux acteurs français

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

Principaux acteurs étrangers

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

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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



Liens avec d'autres technologies clés

51

64

65

Position de la France

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

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

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

Analyse AFOM

Atouts

Communauté de la recherche de niveau international sur les matériaux.

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

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

Soutien actif et continu des pouvoirs publics.

Faiblesses

Peu de fabricants proprement dits de matériaux en France.

Opportunités

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

Menaces

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

Diversité des choix technologiques.

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

Recommandations

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

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

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

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



64. Électronique de puissance



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

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

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

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

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

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

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

Applications

Transports

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

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

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

Description

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

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

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

- Les matériaux doivent évoluer pour permettre une

Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

là encore la gestion de la puissance.

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

Énergie

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

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

Enjeux et impacts

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

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

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

Acteurs

Principaux acteurs français

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

Principaux acteurs étrangers

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

Position de la France

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

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

Analyse AFOM

Atouts

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

Faiblesses

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

Opportunités

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

Recommandations

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

Liens avec d'autres technologies clés

59

63

65

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



65. Mécatronique

Description

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

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

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

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

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

Applications

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

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

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

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

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

Enjeux et impacts

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

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

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



Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

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

Deux verrous sont toutefois à noter concernant son développement :

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

Acteurs

Principaux acteurs français

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



Position de la France

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

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

Analyse AFOM

Atouts

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

Faiblesses

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

Opportunités

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

Menaces

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

Recommandations

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

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

Liens avec d'autres technologies clés

13

58

59

64

69

Maturité (échelle TRL)

●	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



66. Communications et données

Définitions

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

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

Description

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

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

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

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

Ces technologies s'intéressent principalement aux :

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

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

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

Applications

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

Les applications critiques

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

Les applications de services

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

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

Enjeux et impacts

Ces technologies répondent aux enjeux :

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

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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

Acteurs

Principaux acteurs français

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

Position de la France

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

Analyse AFOM

Atouts

Opérateurs importants, constructeurs automobile et équipementiers nationaux.

Faiblesses

Faible coordination des différents acteurs de la chaîne de valeur.

Opportunités

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

Menaces

Risque de développements de protocoles antagonistes.

Recommandations

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

Liens avec d'autres technologies clés

14

16

19

61

62

69

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



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

Définitions

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

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

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

Description

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

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

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

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

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

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

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

Applications

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

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

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

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

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

Enjeux et impacts

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

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

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

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

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

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

Degré de diffusion dans l'absolu

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation

Degré de diffusion en France

● Faible diffusion

● Diffusion croissante

● Généralisation



Acteurs

Principaux acteurs français

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

Position de la France

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

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

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

Analyse AFOM

Atouts

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

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

Faiblesses

Secteur académique tout juste émergent, manque de compétences.

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

Opportunités

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

Menaces

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

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

Recommandations

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

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

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

Liens avec d'autres technologies clés

13

21

62

69

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



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

Définitions

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

Description

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

Parmi les nouveaux matériaux, on pourra citer :

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

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

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

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

Applications

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

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

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

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

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

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

Enjeux et impacts

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

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

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

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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

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

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

Acteurs

Principaux acteurs français

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

Position de la France

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

Analyse AFOM

Atouts

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

Faiblesses

Cloisonnement entre les différentes industries.

Opportunités

Secteur des transports très demandeur, marchés en croissance.

Menaces

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

Recommandations

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

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

Liens avec d'autres technologies clés

1

7

11

69

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

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



69. Outils et méthodes de conception et de validation

Description

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

Ingénierie système :

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

Modélisation et simulation :

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

Évaluation et validation :

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

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



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

Applications

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

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

Enjeux et impacts

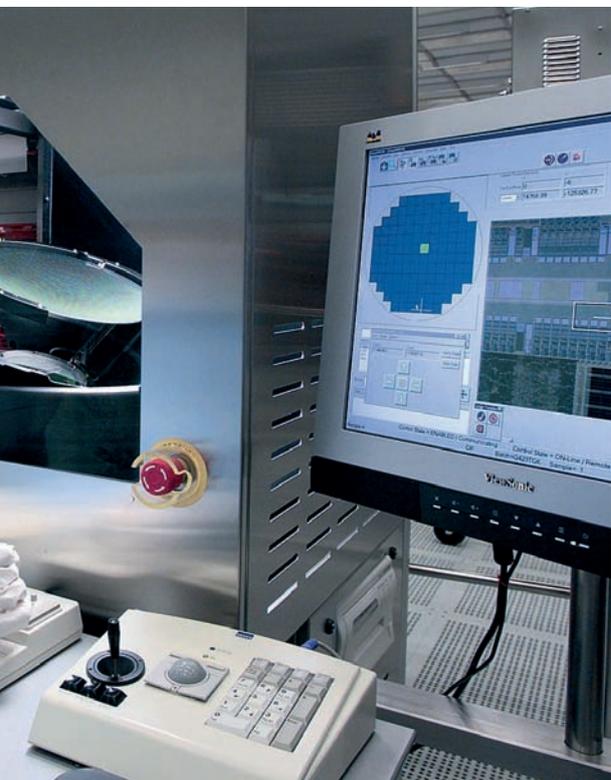
L'écosystème industriel du domaine des transports fait

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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



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

Acteurs

Principaux acteurs français

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

Position de la France

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

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

Analyse AFOM

Atouts

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

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

Quelques PME innovantes.

Faiblesses

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

Faiblesse de l'offre de formation ou de compétences.

Opportunités

Développement de la co-conception.

Menaces

Perte de marché des entreprises au profit des pays émergents.

Recommandations

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

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

Liens avec d'autres technologies clés

19

26

40

58

59

61

62

65

67

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



BIBLIOGRAPHIE

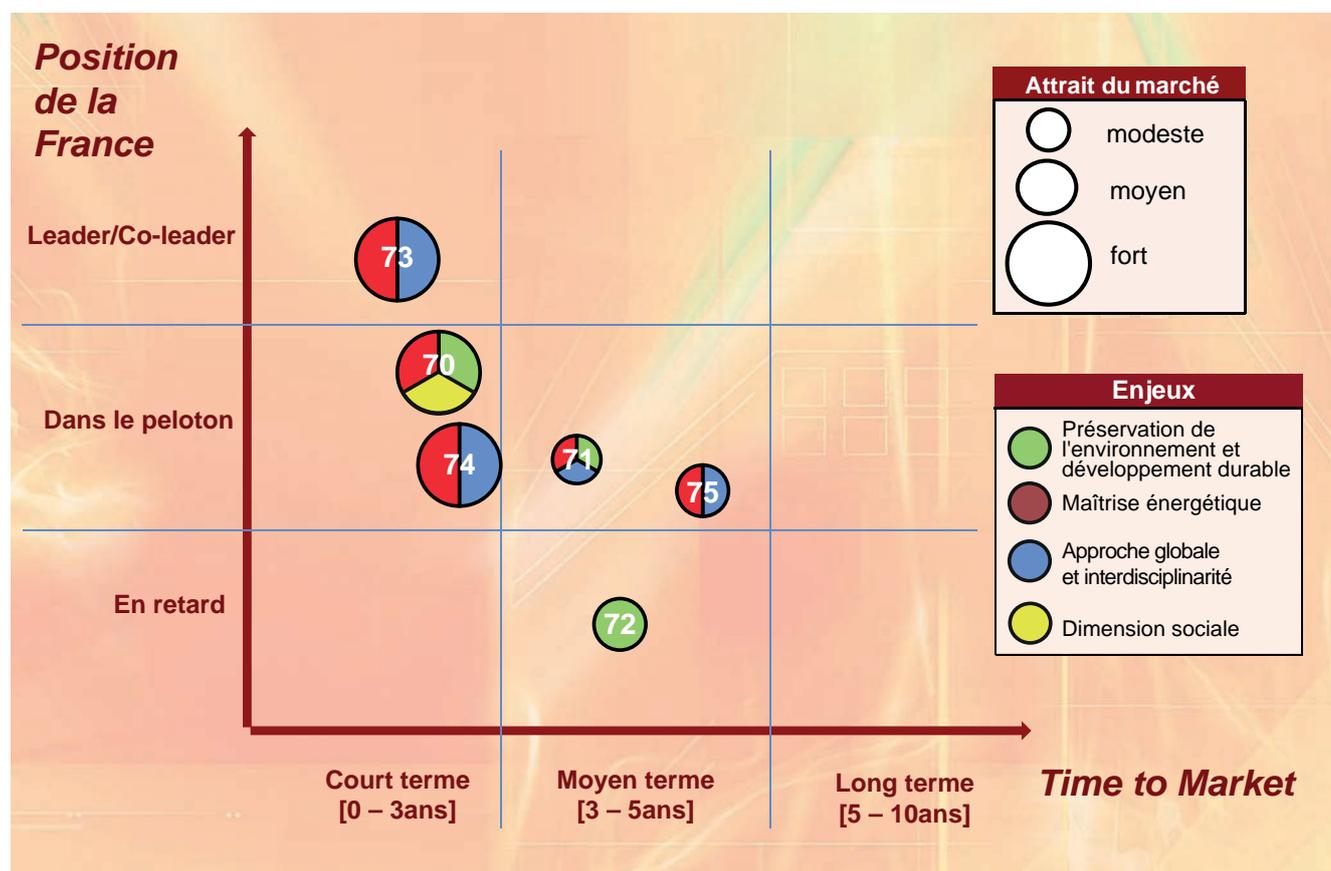
- [5.1] Présentation de la Commission européenne : *Comment expliquer ce qu'est la technologie*, 2005. ftp.cordis.europa.eu
 - [5.2] International Transport Forum : *Key Transport Statistics 2008*, OCDE, 2008, <http://www.internationaltransportforum.org/>
 - [5.3] *Un avenir durable pour les transports*,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

Bâtiment



Bâtiment

- 70. Systèmes d'enveloppe du bâtiment
- 71. Systèmes constructifs
- 72. Matériaux biosourcés, composites et recyclés
- 73. Maquette numérique
- 74. Comptage intelligent
- 75. Technologies d'intégration et de mutualisation des ENR dans le bâtiment



Contexte et enjeux

Le secteur économique du bâtiment

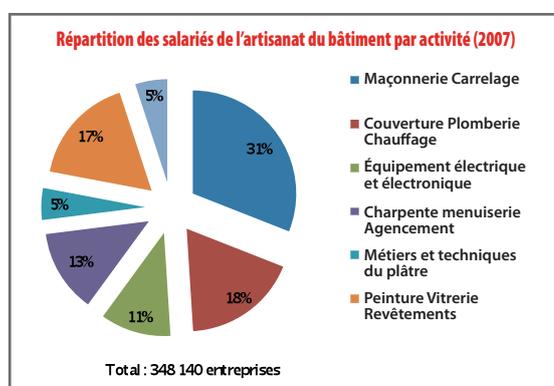
Le secteur français du bâtiment est un secteur économique de première importance : il emploie 1,5 million de salariés [1] au sein de 371 200 entreprises, dont 98 % d'entreprises de moins de 21 salariés (362 193 entreprises), ces dernières employant 67 % des effectifs du bâtiment [2].

Le marché s'est contracté depuis 2008 du fait de la crise économique, passant de 136,1 Md€ constants en 2008 à 127,1 Md€ (soit - 7 %). Néanmoins, et en dépit d'une année 2009 particulièrement difficile, l'emploi s'est considérablement développé depuis le début des années 2000, avec la création nette de 115 000 emplois pour les entreprises de moins de 20 salariés. Autre élément d'importance : d'après la Capéb, 60 000 embauches annuelles seront nécessaires pour faire face aux départs en retraite.

Le secteur est atomisé et les entreprises de moins de 20 salariés réalisent une part importante du chiffre d'affaires du bâtiment : 78,5 Md€, soit 62 % en 2009 [3], comme indiqué dans le tableau suivant.

Tranches d'effectifs	Chiffre d'affaires 2009 (en Mds€ constants 2007)	Répartition
Entreprises de 0 à 10 salariés	61,0	48%
Entreprises de 11 à 20 salariés	17,5	14%
Entreprises de moins de 21 salariés	78,5	62%
Entreprises de 21 salariés et plus	48,6	38%
TOTAL Bâtiment	127,1	100%

Le bâtiment représente une large palette de secteurs d'activités hétérogènes : le gros œuvre (93 539 entreprises), le second œuvre (147 991 entreprises) et les équipements techniques et électriques (106 610 entreprises). Pour étayer ce propos, le schéma suivant indique la répartition des salariés de l'artisanat du bâtiment par activité [4].



Le marché du bâtiment est composé de la construction neuve et de la rénovation (également appelé entretien – amélioration).
 • Le marché de la construction neuve a particulièrement souffert du contexte de crise : il représente 326 089 logements et 30 155

constructions en non résidentiel (chiffres déclarés commencés en septembre 2009), soit respectivement - 21 % et - 20 % que sur la même période un an auparavant. La France n'est pas seule concernée par le recul du marché de la construction immobilière, en particulier la construction de logements, qui a conduit à une baisse du volume européen de la construction de plus de 8 %.
 • Le marché de la rénovation représente près de la moitié du chiffre d'affaires global du secteur (48 % de l'ensemble de la production bâtiment) pour un volume de plus de 60 Md€ en 2007¹, les entreprises de moins de 20 salariés réalisant pour leur part 55 % de leur chiffre d'affaires dans l'entretien – amélioration [5].

Les fournisseurs de la construction

Les fournisseurs de la construction ne doivent pas être occultés puisque les contraintes environnementales et les économies d'énergie constituent des incitations à l'innovation les conduisant à améliorer les produits et procédés de fabrication correspondants. Du sol à la toiture, en passant par les vitrages, les matériaux évoluent en effet pour répondre à une attente des consommateurs et pour se mettre en conformité avec les nouvelles réglementations.

Ils rassemblent en France environ 11 000 entreprises du gros œuvre et du second œuvre, dont 80 % d'entreprises de moins de 20 salariés, et emploient plus de 300 000 salariés pour un chiffre d'affaires global de 54 Md€ (données 2005). La répartition d'entreprises entre gros œuvre et second œuvre est équilibrée, mais le second œuvre rassemble près de deux tiers des emplois [6].

		Nombre	Effectif employé	Chiffre d'affaires HT (M€)
Entreprises de plus de 20 salariés	Gros œuvre	1 167	83 893	17 873
	Second œuvre	1 046	172 208	30 071
	Total	2 213	256 101	47 944
Entreprises de moins de 20 salariés	Gros œuvre	4 266	24 270	3 332
	Second œuvre	4 638	26 320	3 233
	Total	8 904	50 590	6 566
TOTAL		11 117	306 691	54 510

L'offre des fournisseurs français est très variée et comprend des matériaux et produits de nature et de fabrication très différentes : du béton aux ascenseurs, en passant par tous les types de menuiseries. En 2005, les produits destinés au gros œuvre représentaient 40 % des facturations dont près de 70 % consacrés à la filière béton. Dans le cadre du second œuvre, les travaux d'installation absorbent près du tiers des facturations correspondantes, avec une part importante pour les matériels électriques. Le marché dépend très fortement de l'activité de construction, qui, après plusieurs années de tonicité marquée (en termes de facturations, la production des fournisseurs de la construction a progressé de 18 % entre 2000 et 2005), connaît une période difficile.

(1) Hors travaux de bricolage conduits directement par les ménages.

	Nombre (millions de logements)	Surface (millions de m ² habitables ou utiles)	Consommations Électricité (TWh)	Consommation Gaz (TWh)	Consommations autres	Total consommation	%
Maisons individuelles	17,3	1 782	94,7	96,0	95,0	285,7	43,3
Immeubles collectifs	13,4	884	43,5	81,8	26,8	152,1	23,1
Total résidences	30,7	2 666	138,2	177,8	121,8	437,8	66,4
Total bâtiments tertiaires		850	90,0	72,3	58,9	221,2	33,6
TOTAL		3 516	228,2	250,1	180,7	659	100

Le poids du bâtiment dans la consommation énergétique et du point de vue environnemental

Le bâtiment représente près de la moitié de la consommation en énergie finale et près du quart des émissions de CO₂. Malgré une baisse de la consommation unitaire, la consommation d'énergie des bâtiments a augmenté de 30 % au cours des trente dernières années (avant de décroître depuis 2001) du fait de l'accroissement du parc des bâtiments, de la surface moyenne des logements, de l'augmentation du confort et de l'apparition de nouveaux usages contribuant à l'augmentation forte de la consommation d'électricité.

Depuis 1990, le bâtiment et les transports représentent les deux seuls secteurs qui ont vu la part de leurs émissions de CO₂ augmenter de 21 % et 17 % respectivement [7]. Pendant la même période, la part des émissions de CO₂ de l'industrie diminuait de 21 % et celle de l'agriculture de 6 %. Le parc immobilier résidentiel et tertiaire produit un quart des émissions de CO₂, soit la troisième source d'émissions. Il consomme 40 % des consommations énergétiques globales, soit 660 TWh, la consommation moyenne annuelle d'énergie du secteur étant de l'ordre de 240 kWh/m² d'énergie primaire par m² et par an. Deux grands types de bâtiments sont à considérer car il s'agit d'associer à chaque cible une stratégie adaptée dans un souci d'efficacité et de lisibilité. L'énergie est consommée pour les deux tiers dans les logements et pour un tiers dans les bâtiments tertiaires. La part des émissions de CO₂ suit une répartition identique. Les données suivantes précisent les données clés pour chacun des deux secteurs et permettent notamment de comprendre l'importance de la rénovation [8].

- Les bâtiments résidentiels représentent 30,7 millions de logements (dont 4,5 millions de logements sociaux), plus de 2,666 Md€ de m² utiles ou habitables [9] (1,782 Md€ de m² pour les maisons individuelles et 0,884 Md€ de m² pour les immeubles collectifs), 28 % des consommations d'énergie finale et 12 % des émissions de CO₂. Compte tenu du taux de renouvellement du parc, la rénovation des 19 millions de logements construits en France avant la première réglementation thermique (RT) de 1975 est cruciale (57 % du parc et plus de 75 % de la consommation d'énergie du secteur).

- Les bâtiments tertiaires représentent 0,850 Md€ de m² et 25 à 30 % de la consommation finale d'énergie du secteur. Il s'agit d'un secteur complexe et hétérogène aux problématiques multiples liées aux types de bâtiments, à la nature de l'activité, à leur usage, etc. Les branches les plus consommatrices d'énergies sont les bureaux (25 % de la consommation d'énergie totale), les commerces (23 %), les écoles (13 %), les hôpitaux (12 %) et les cafés, hôtels et restaurants (10 %).

Le tableau ci-dessus résume les consommations énergétiques finales par usage [9].

L'évolution du cadre réglementaire et des exigences de performance environnementale

Le Grenelle de l'environnement a consacré le rôle clé au secteur du bâtiment en étoffant considérablement le cadre réglementaire autour des normes bâtiment basse consommation (BBC - 2012) et bâtiment à énergie positive (Bepos - 2020) dans la perspective d'une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre.

Le Grenelle 1 a fixé des objectifs très ambitieux pour le bâtiment existant : - 12 %, soit une consommation énergétique moyenne de 210 kWh/m²/an, à horizon 2012, - 38 %, soit une consommation énergétique moyenne de 150 kWh/m²/an, d'ici 2020 et - 70 à - 80 %, soit une consommation énergétique moyenne de 50 à 80 kWh/m²/an, d'ici à 2050.

Cela revient à un objectif de 400 000 logements à rénover par an à compter de 2013, 800 000 logements sociaux d'ici à 2020 et à assurer la rénovation énergétique de l'ensemble des bâtiments de l'État et de ses établissements publics avant fin 2012. Concernant spécifiquement la rénovation du parc existant et dans l'hypothèse où l'objectif de 400 000 logements par an sera atteint, le marché de la rénovation énergétique des logements s'élèverait à 16 Md€ par an à horizon 2020³ et même à 24 Md€ en ajoutant les équipements de chauffage mobilisant les énergies renouvelables installées (chaudières à condensation, pompes à chaleur, chaudières individuelles au bois et solaire thermique). Le développement de la filière bénéficierait aux entreprises du bâtiment (artisans et PME) avec la création anticipée de 90 000 emplois à horizon 2020, ainsi qu'aux entreprises de production

(2) L'énergie primaire représente l'énergie nécessaire pour extraire, distribuer, stocker et produire l'énergie mise à disposition chez le consommateur. Dans le cas de l'énergie électrique, le kWh primaire amené par le réseau est égal à 2,58 fois le kWh final, énergie mesurée au compteur de l'abonné.

(3) En France, le marché de la rénovation des logements avec des solutions performantes s'élève à 7 Md€ par an en 2007 en incluant les ventes de matériels et de services d'installation.

et d'installation d'équipements performants avec la création potentielle de 60 000 emplois. Le marché des services de gestion de la performance énergétique s'élèverait à 6 Md€ en 2020 avec la création de plusieurs milliers d'emplois [8, 10]. L'isolation extérieure, intérieure, la couverture et les finitions seront clés, la suppression totale des ponts thermiques, l'étanchéité à l'air et la maîtrise des techniques de pose étant à atteindre à court terme. La rénovation thermique des bâtiments implique donc de nombreux corps de métiers autour de la notion d'enveloppe du bâtiment. L'isolation des combles, ainsi que l'étanchéité des toitures, constituent également des axes clés de rénovation. Ces objectifs sont d'autant plus ambitieux qu'ils s'inscrivent dans un contexte d'augmentation des prix de l'énergie et des charges induites pour les entreprises et les ménages, l'efficacité énergétique devant pourtant constituer une option économique attractive pour les consommateurs [7]. Il s'agit alors de fournir des équipements à un coût abordable ou maîtrisé au regard de la demande.

Le Grenelle 2 décline, pour sa part, chantier par chantier, secteur par secteur, les objectifs entérinés par le premier volet législatif du Grenelle de l'environnement. Ce texte d'application et de territorialisation du Grenelle permet ainsi de mettre en œuvre d'une part, la rupture technologique dans le neuf et d'autre part, la rénovation thermique accélérée du parc ancien. Concernant le bâtiment, il s'engage à l'amélioration énergétique des bâtiments et à l'harmonisation des outils de planification. Pour cela, il précise qu'il sera nécessaire de favoriser un urbanisme économe en ressources foncières et énergétiques, mieux articulé avec les politiques d'habitat, de développement commercial et de transports tout en améliorant la qualité de vie des habitants, notamment à travers le renforcement du code de l'urbanisme, la généralisation des schémas de cohérence territoriale (SCOT) et la réforme de la réglementation de l'affichage publicitaire.

Les grandes tendances d'évolution du secteur

Grandes tendances et enjeux globaux

L'évolution souhaitée ne se fera qu'à la condition de développer une filière industrielle capable d'évoluer vers l'intégration de l'éco-conception et de l'« énergie grise » tant sous la dimension du KW, que sur celle du CO₂, c'est-à-dire dans le sens d'une approche globale basée sur l'intégration de l'ensemble des corps de métier au moment de la conception, sur l'émergence d'une culture du résultat et non plus uniquement de moyens, sur l'incitation à l'utilisation de technologies et de services de gestion active des équipements et sur l'industrialisation de la filière des installateurs-diagnostiqueurs. Selon la définition de l'Ademe, « l'éco-conception consiste à intégrer l'environnement dès la phase de conception des produits, qu'il s'agisse de biens, de services ». Elle nécessitera que la production des déchets soit prise en compte dès la conception des produits, comme les méthodes de construction pour en favoriser de manière effec-

tive le recyclage. Le bâtiment n'est actuellement pas un acteur majeur de la valorisation des déchets, un effort important au niveau des techniques de recyclage restant encore à effectuer en amont de leur diffusion. Il s'agit donc également d'un enjeu transversal aux technologies clés puisque l'ensemble des produits du bâtiment est concerné. De plus, il est nécessaire que l'utilisation de matériaux de réemploi, contenant des éléments recyclés ou renouvelables soit favorisée. Dans cette optique, il s'agit de mettre en place une vraie politique de gestion des ressources au niveau local.

Dans ce contexte à forts enjeux, les contrats de performance énergétique (CPE) et la mise en place de bouquets de travaux joueront un rôle clé. L'un des premiers enjeux clés du bâtiment est de développer une gamme performante de services autour d'offres globales, fondées sur l'assemblage de techniques et de technologies visant à satisfaire de manière cohérente l'amélioration énergétique et environnementale des bâtiments, ainsi que le respect de leurs spécificités et usages. De tels bouquets de travaux doivent être déclinés en fonction des objectifs attendus et des différentes réglementations à venir. Ils devront être fondés sur un assemblage raisonné de techniques concourant à satisfaire de manière cohérente l'amélioration énergétique et le respect des spécificités du bâtiment, telles que les aspects d'accessibilité, d'usages et de santé-environnement (émission de substances nocives pour la santé, telles que les CMR⁴, les COV⁵, etc.).

De tels bouquets doivent s'appuyer sur une amélioration globale des façons de faire. Cette évolution devra se dérouler dans le sens de l'interopérabilité ou du décloisonnement des corps de métiers permettant de connaître les points de vigilance des autres (approche interdisciplinaire).

Les formations, tant initiales que continues, devront évoluer, leurs référentiels, ainsi que le tissu de formateurs les prodiguant. C'est une condition *sine qua non* de la mobilisation de l'ensemble des professionnels ; 225 000 personnes devront être formées chaque année pendant dix ans pour atteindre les objectifs du Grenelle, notamment ceux portant sur la rénovation. Le défi est donc à la fois quantitatif (augmentation du nombre de professionnels à former et renforcement de la formation continue pour les professionnels déjà en activité) et qualitatif (formation des professionnels sur des techniques, technologies ou équipements innovants ; développement de l'interopérabilité) pour aider l'ensemble des entreprises à renforcer collectivement leur visibilité et capacité à répondre à la nouvelle demande à venir.

(4) Substances chimiques à caractère Cancérogènes, Mutagènes ou toxiques pour la Reproduction.

(5) Composés Organiques Volatiles.

Produits et services qui permettront de répondre aux enjeux 2015-2020

Commercialisation d'offres de bouquets de travaux gérant l'interface bâti-équipements-usages

Les professionnels du secteur doivent encourager la réalisation de bouquets de travaux conduisant statistiquement à une amélioration de la performance énergétique : les bouquets de travaux sont composés des opérations à meilleurs rendements énergétiques et à meilleurs retours sur investissements. Ils combinent de manière raisonnée différentes solutions, par exemple, le remplacement des fenêtres avec l'isolation des parois et de la toiture, l'installation d'équipements d'énergies renouvelables, etc.

En rénovation du tertiaire et du collectif résidentiel, le besoin en isolation doit être systématiquement évalué. Dans le but de parvenir à la suppression des ponts thermiques, les professionnels doivent évoluer vers une parfaite maîtrise. L'isolation thermique intérieure doit donc se baser sur une très bonne connaissance des matériaux et de leurs poses, notamment pour les matériaux d'isolation répartie, tels que les briques à alvéoles (briques monomur), les briques cellulaires, ou encore les matériaux d'origine renouvelable. De même, la mise en œuvre de l'isolation thermique par l'extérieur doit être généralisée à l'ensemble des maçons, menuisiers et plâtriers à court terme.

Services de gestion active de la performance énergétique

Une rupture technologique des solutions de gestion active des équipements et des services existants est souhaitée. Sont concernés les équipements à haut rendement (appareils électroménagers performants, lampes et luminaires à haut rendement, moteurs à haut rendement, câbles à section adaptée pour limiter les déperditions d'énergie, etc.), les équipements de régulation (régulation et pilotage des systèmes de chauffage et de climatisation, système de gestion de l'éclairage (gradation, détection de présence, variateurs de vitesse, etc.) et les services d'optimisation de la consommation énergétique⁶.

Les services d'optimisation de la consommation énergétique reposent sur l'établissement de contrats de performance énergétique, les actions diagnostic de la performance énergétique initiale et celles de mise en place d'actions d'amélioration. Les contrats de performance énergétique sont cruciaux car ils permettent de garantir la réalisation des économies d'énergie affichées en matérialisant les potentiels de gains par la gestion active. L'amélioration de l'efficacité énergétique doit être en effet vérifiable et mesurable (ou estimable). Le prestataire doit fournir une garantie de résultats et mettre en œuvre les moyens lui permettant de s'engager par contrat pour atteindre durablement les objectifs de qualité et d'amélioration annoncés et contrôler et mesurer la performance.

Opérations de diagnostic et de suivi (commissionnement) du bâti existant

Le diagnostic, le suivi et l'évaluation sont des fonctions clés à

renforcer, du fait de leur rôle central dans l'amélioration des pratiques de la filière. Le prestataire du contrat de performance doit être l'interlocuteur unique et engagé sur des résultats contractualisés et quantifiables. Son principe est le suivant : il contractualise l'obligation de résultats autour d'une garantie de gain énergétique, définit les actions d'amélioration énergétique et assure l'exploitation dans la durée du bâtiment afin de pérenniser les gains, rentabiliser les actions d'amélioration énergétique et vérifier les performances selon une méthode de mesure et de calcul définie.

L'opérateur, par sa connaissance des bâtiments et sa présence régulière sur le terrain, est ainsi en mesure de diagnostiquer les actions d'amélioration, de contrôler la réalisation des travaux et de faire jouer les garanties dans les premiers mois suivants les travaux, de décider d'investissements complémentaires au regard des contraintes économiques et de maximiser l'impact des actions d'amélioration énergétique par sa bonne gestion. L'ensemble de la filière est à mobiliser, à commencer par les maîtres d'ouvrage dont le rôle est déterminant, notamment pour les marchés publics. Leur sensibilisation pour la formalisation des cahiers des charges respectant les critères environnementaux et faisant la demande explicite d'une approche globale est nécessaire.

Le suivi (ou « commissionnement ») consiste à définir les procédures, assurer la réalisation des essais, vérifier et contrôler les équipements individuels et les systèmes, vérifier les performances, former les personnels d'exploitation et de maintenance. Cette fonction est d'autant plus importante que de nouveaux systèmes-concepts constructifs intégrant de nouveaux équipements et matériaux verront le jour.

Matériaux biosourcés, composites et recyclés

• Les matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés sont issus de ressources végétales renouvelables qu'il s'agisse d'agro-ressources (chanvre, lin, bois, etc.), ou de matériaux issus du recyclage (ouate de cellulose, fibres de bois, etc.). Ils sont l'une des voies de valorisation de la biomasse et permettent de limiter l'appauvrissement des ressources fossiles. Leur incorporation, pour tout ou partie, à la place des matériaux d'origine pétrochimique ou minérale permet d'envisager une réduction des rejets de gaz à effet de serre. En plus d'adresser l'enjeu de renouvelabilité, ils permettent également d'adresser celui de la recyclabilité dans le cas de la réutilisation du matériau après récupération et traitement. Ils présentent un bon bilan écologique, une bonne stabilité et présentent l'avantage de s'inscrire dans un schéma de développement local ou régional.

L'utilisation de bois (en élément de bardage, de structure, ou d'aménagements intérieurs) et d'autres plantes annuelles, telles que le chanvre, le lin (en isolants) permet d'économiser les ressources si toutefois le renouvellement effectif des matériaux est assuré. Dans le cas du bois, les labels FSC (*Forest Stewardship Council*) et PEFC (*Pan European Forest Certification*) offrent une garantie sur la gestion durable des forêts. La provenance du matériau doit également faire l'objet d'une attention particulière. Ils peuvent être utilisés tant en construction neuve, en parti-

(6) Définition des services d'efficacité énergétique d'après le Club des services d'efficacité énergétique (CS2E).

culier pour le bois, qu'en rénovation. Le béton représente, dans un bâtiment classique, 50 à 75 % de la masse totale de tous les matériaux qui le composent alors qu'il ne représente qu'environ 10 % de la masse dans un bâtiment à ossature bois. La mission « Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois » confiée à Jean Puech, ancien ministre, et remise au président de la République en avril 2009, insiste particulièrement sur l'utilisation du bois au regard de la sous-exploitation et de l'expansion de la forêt française : elle s'accroît de 25 000 hectares par an et le volume moyen à l'hectare de bois sur pied a triplé. L'utilisation du bois dans le bâtiment serait de plus une source importante de création d'emplois. Si la filière bois emploie actuellement 231 000 salariés en zone rurale et près de 450 000 avec toute la filière bois, le fait de mobiliser 12 millions de m³, espérés d'ici à 2010, créerait environ 40 000 emplois supplémentaires dans les territoires ruraux (emplois non délocalisables) dont 14 000 pour l'exploitation forestière amont. La poursuite de cette mobilisation à 21 millions de m³ d'ici à 2020 devrait doubler ce chiffre [10].

• Les matériaux recyclés

Certaines matières premières non renouvelables et parfois même rares (comme certaines essences de bois) sont utilisées de manière trop systématique dans la construction alors qu'il existe des solutions de remplacement. Il peut s'agir des déchets de construction et de démolition du bâtiment et du génie civil, mais aussi des déchets et des sous-produits issus d'autres secteurs industriels. L'objectif est de proposer des matériaux nouveaux, et non simplement des matériaux de récupération.

Intégration des énergies renouvelables (ENR) dans le bâti existant et dans la construction

L'essor des ENR est l'un des objectifs majeurs du Grenelle, le solaire thermique, les pompes à chaleur, la biomasse et le photovoltaïque étant les principales sources d'ENR afin d'atteindre ces objectifs. Il s'agit d'utiliser des outils, des méthodes ou des systèmes permettant d'intégrer des « composants ENR » pour la production d'électricité, pour le chauffage et la climatisation, ainsi que pour l'eau chaude sanitaire et d'utiliser les sources d'énergies renouvelables (vent, soleil, sol et biomasse). Les exigences sont multiples et ne concernent pas le seul aspect énergétique : multifonctionnalité, esthétique, facilité de mise en œuvre et de gestion, prise en compte des usages, coût, etc.

Les principales sources d'énergies renouvelables sont pour le bâtiment : le solaire thermique, le solaire photovoltaïque, la géothermie et le bois énergie. Les applications concernent principalement la production d'eau chaude (pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire) et la production d'électricité (pour un usage propre ou la revente sur le réseau). La production de chauffage, d'eau chaude ou d'électricité à partir d'énergies renouvelables, va de pair avec une utilisation rationnelle de l'énergie liée d'une part à la performance des enveloppes de bâtiments et d'autre part à la maîtrise de l'ensemble des énergies des bâtiments. Ces ENR peuvent être combinées, tant pour la construction neuve, pour laquelle l'intégration peut être prévue dès le stade de conception, que pour les opérations de rénovation.

Le solaire thermique est en forte croissance et constitue l'un



des principaux enjeux à l'horizon 2020. Les installations de systèmes solaires combinés (SSC) (chauffage et eau chaude sanitaire) étaient en 2007 en augmentation de 37 % par rapport à 2006 avec 5 500 systèmes installés et les chauffe-eau solaires individuels (CESI) en augmentation de 1 % avec 30 000 appareils installés. Avec 18,50 m² de capteurs solaires installés pour 1 000 habitants, et comparé à l'Allemagne qui en compte 104 m²/1 000 habitants, la France dispose d'un fort potentiel de développement. 4 millions de chauffe-eaux solaires devront être installés à l'horizon 2020. Les prix demeurent néanmoins élevés et en augmentation régulière, alors qu'une baisse des prix serait attendue suite au développement de cette filière.

Une rupture sur les équipements de chauffage et sur leur utilisation est nécessaire. L'utilisation de nouvelles solutions de chauffage efficaces (chaudières gaz à condensation, chaudières bois à haut rendement, pompes à chaleur air/eau et eau/eau, micro-génération bois, gaz) est souhaitée pour réduire de manière significative les consommations, ainsi que des solutions d'ap-



point pour l'eau chaude sanitaire : Cesi et SSC. Le marché est en croissance : 150 000 pompes à chaleur vendues en 2008 (deux fois plus qu'en 2007), 1,2 million de logements à équiper d'ici à 2012. Il nécessite néanmoins une montée en compétences des installateurs et devra reposer sur un dimensionnement plus cohérent des équipements.

Le photovoltaïque sera clé à échéance 2020 mais son essor semble encore limité pour les constructions individuelles, notamment en raison de son coût. De même, la géothermie tarde à se développer, les savoir-faire, notamment les techniques de forage profond, étant peu maîtrisés. La faisabilité de cette technologie nécessite une étude préalable des sols et le développement adéquat des compétences. Le micro-éolien peut constituer, dans quelques cas, une évolution intéressante pour la construction, même s'il participera pour une part moindre aux objectifs 2020 du Grenelle (d'après le comité opérationnel 1). Les problèmes de performance, de longévité des matériaux et de leur installation, urbaine notamment, freinent l'essor de cette technologie.

Utilisation des TIC et de maquettes numériques dès la conception en construction neuve

Pour les bâtiments tertiaires ou résidentiels collectifs, la maquette numérique de conception, réalisation et exploitation devra être généralisée. Elle aura une triple fonction : simulation et formation aux nouveaux procédés et aux nouvelles techniques, collaboration en temps réel entre les professionnels lors du chantier, support de gestion technique durable du bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie. Une politique volontariste pourrait favoriser l'émergence d'une offre compétitive par l'industrie française des logiciels graphiques.

L'utilisation des TIC sera fondamentale en aval pour assurer une information et un suivi de l'utilisation dans le but d'en assurer une performance optimale. Le comportement des usagers peut en effet faire varier les consommations de 5 à 25 kWh/m²/an pour des logements passifs consommant 15 kWh/m²/an en théorie. L'affichage des consommations d'électricité, de gaz et d'eau de chaque habitation est un passage obligatoire pour s'assurer de la bonne utilisation des bâtiments et éviter un possible effet de rebond.

Les tendances technologiques et les technologies clés

Les technologies capacitantes clés support sont les suivantes :

- les technologies permettant l'intégration des ENR dans une optique de mutualisation et de gestion active de la performance énergétique et environnementale ;
 - les technologies de comptage intelligent ;
 - la généralisation des outils de modélisation de la performance et des maquettes numériques ;
 - les systèmes d'enveloppe du bâtiment ;
 - l'intégration des matériaux biosourcés, composites et recyclés ;
 - les offres de systèmes constructifs (conception, organisation et gestion de la fabrication des produits utilisés dans le bâtiment).
- Les technologies capacitantes trouveront leur place dans les produits, *process* et services en assurant : un même niveau de certification pour les nouveaux matériaux (résoudre les problèmes de garantie décennale) et une formation continue des professionnels dans le but de proposer les services optimaux en termes de pose et de maintenance, tant sur les produits que services existants et nouveaux. L'objectif est d'autant plus important qu'il sera nécessaire de capitaliser très rapidement sur les premières expériences de démonstration et de réalisation et de ne pas « discréditer » les nouvelles offres pour en assurer une diffusion large et pérenne.



Analyse de la position de la France

Position de la France

Le bâtiment constitue plutôt une zone de force pour la France, notamment sur le plan industriel : la présence de grandes entreprises industrielles, de fournisseurs de solutions d'efficacité sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'efficacité énergétique (Saint-Gobain, Lafarge, Vicat pour les produits de construction, Dalkia et Cofely pour l'exploitation énergétique, Schneider et Legrand pour les équipements, Vinci, Bouygues et Eiffage pour le BTP, SPIE pour l'ingénierie de la mesure et le comptage intelligent), et d'un large tissu de PME (300 000 entreprises). La France dispose également d'une position solide sur le plan scientifique avec de nombreux laboratoires publics et privés et des acteurs tels que le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB). De nombreuses initiatives sont également à relever, dont la maison à énergie positive et celles au sein des pôles Advancity, Derbi (Développement des énergies renouvelables dans le bâtiment et l'industrie), Cap Digital, ou de pôles impliqués dans la valorisation de la biomasse non alimentaires, tels que Alsace Energivie, IAR (Industrie et Agro-Ressources), Pôle Fibres Grand Est, Xylofutur, etc.

Une dynamique forte d'autres initiatives de type clusters-centres de ressources-plateformes de ressources régionales est égale-

ment à citer : cluster éco-habitat en Poitou-Charentes, Ekopolis en Île-de-France, Envirobat Méditerranée en région Paca, Nobatek à Anglet, etc. D'autres régions, comme le Nord-Pas-de-Calais, ont créé une agence régionale de la création et de développement des éco-entreprises (CD2E) qui accompagne notamment les entreprises dans les démarches techniques de validation. Par ailleurs, les Grands ateliers de l'Isle-d'Abeau permettent de favoriser des synergies dans les domaines de l'art, de l'ingénierie et de l'architecture en regroupant des étudiants en architecture, des élèves ingénieurs et des étudiants d'art qui peuvent croiser leurs approches avec celles d'industriels et de professionnels. Néanmoins, et malgré une prise de conscience sur le territoire à travers les actions des collectivités et de regroupements d'artisans, un retard important vis-à-vis de pays plus avancés en matière de bâtiment à moindre impact environnemental, est à signaler. Les pays nordiques, ou encore l'Allemagne, font figure d'exemple. L'Allemagne a ainsi mis en place depuis une dizaine d'années des obligations réglementaires lors de la rénovation des logements pour accélérer la rénovation thermique des bâtiments anciens (réglementation EnEV depuis 2002), des actions de structuration de l'offre par des programmes pilotes (dans le cadre du projet pilote « *Niedrigenergiehaus im Bestand* » de l'Agence allemande de l'énergie) pour industrialiser les opérations et en limiter les coûts et une véritable culture du résultats (subventions octroyées en fonction de l'ambition des projets et des résultats atteints).

La conséquence est que s'il existe bien un secteur du bâtiment en France, la filière « efficacité énergétique du bâtiment » est plus diffuse et les offres en prestation globale (hors les majors du BTP) doivent être accrues. De même la notion de coût global par les maîtres d'ouvrages qui privilégient encore le moins-disant devrait être plus utilisée.

Dispositif d'accompagnement

Le dispositif d'accompagnement est en place avec les réglementations thermiques (RT 2010 et RT 2020) fixant les objectifs à atteindre et définissant les actions :

- généralisation des logements neufs BBC dès 2012 (50 kWh (primaire)/m²/an) et transition vers les bâtiments passifs (Bepas) caractérisés par des besoins de chauffage inférieurs à 15 kWh/m²/an, ces derniers pouvant devenir à énergie positive (Bepos) en utilisant les énergies renouvelables d'ici à 2020 ;
- réalisation, d'ici à cinq ans, d'environ un tiers des bâtiments neufs BBC et, sur la période 2008-2012, d'au moins 25 % de logements BBC et 10 % de Bepas ou Bepos ;
- adoption en 2010 d'une nouvelle réglementation thermique (RT très haute performante énergétique THPE) et en 2015 de la RT bâtiment basse consommation (BBC) ;
- réduction de 12 % en 2012 de la consommation du parc ancien et de 38 % en 2020 ; passer d'une consommation de 240 kWh/m²/an à 210 kWh/m²/an en 2012 et 150 kWh/m²/an en 2020. Pour le tertiaire l'objectif est de 80 kWh/m²/an ;
- création des labels BBC rénovation et BBC compatible ;
- lancement d'un grand programme de formation profession-

nelle et d'un programme de recherche spécifique afin de réduire les coûts, appuyé par les fédérations professionnelles ;

- etc.

De nombreuses autres mesures ont été mises en œuvre pour soutenir les politiques définies en matière de développement des énergies renouvelables et d'amélioration de l'efficacité énergétique. Parmi elles : les labels de qualité dans les énergies renouvelables, les étiquettes énergie sur les équipements du foyer, le système du bonus malus écologique, la mise en place de financements spécifiques (tels que le livret développement durable), etc.

La combinaison des objectifs réglementaires issus du Grenelle de l'environnement et des aides accordées pour la rénovation énergétique des bâtiments devrait fortement dynamiser le marché. Le potentiel de croissance est important en cas de mise en œuvre massive de ces solutions à horizon 2020 (marché de 20 Md€ par an, 110 000 emplois nets et 82 TWh économisés annuellement).

Freins à la diffusion des technologies capacitanes

L'inertie du tissu de formation et le manque de lieux de démonstration et/ou de formation sur sites

Les professionnels du bâtiment doivent être les acteurs et vecteurs de conviction et les prescripteurs des consommateurs. Or, le niveau de compétences évolue trop lentement, d'où des cloisonnements encore importants entre corps de métiers, par exemple entre le monde des TIC et celui du bâtiment. Ces éléments sont des freins à l'usage de procédés innovants (intégration des ENR et de systèmes hybrides, intégration de produits d'origine renouvelable, etc.) et à la diffusion de la culture du résultat. Pour accélérer les mutations, il sera nécessaire de rapprocher la formation des professionnels des lieux de réalisation et de démonstration en capitalisant sur les formations existantes, en particulier celles du Feebat et Crepa.

Les métiers doivent intégrer une dimension de conseil, de prescription et de service d'optimisation de la consommation : évolution du métier de fournisseur vers celui garantissant un service ; pour l'énergie, évolution d'un métier de pose vers celui d'énergéticien. Il est nécessaire de développer une filière de thermiciens conseils avec des compétences multi-produits. Ils contribueront ainsi directement à l'adoption de matériaux et d'équipements performants en les mettant en « première ligne commerciale », en adaptant leur offre et leur discours et en pratiquant des prix attractifs.

Les interactions entre acteurs, métiers et compétences doivent être modifiées autour de plusieurs groupes de métiers : la conception-programmation (architectes et bureaux d'études), l'enveloppe (maçons, couvreurs, charpentiers, menuisiers, plaquistes, peintres), les équipements (chauffagistes, plombiers, électriciens, génie climatique) et les fournisseurs de matériaux et d'énergie (fournisseurs, fabricants industriels, fabricants artisanaux). Cette évolution passera par des plateformes de démonstration au sein de lieux communs d'apprentissage sur des techniques

clés (caméras thermiques, filtrométrie, équipements d'ENR) ainsi que des visites de chantiers démonstratifs mettant l'accent sur l'absence de ponts thermiques, l'étanchéité à l'air, le rationnel du choix des équipements et de leur dimensionnement, la pose optimale des freine-vapeurs et isolants en couche mince. De tels dispositifs permettront de passer du modèle traditionnel de responsabilisation par lot (ne permettant pas d'assurer une cohérence globale) à un modèle intégré où la conception et la réalisation sont organisées autour d'un objectif commun à l'ensemble des acteurs partageant les responsabilités. La formation de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre (bureaux d'études et architectes) ne devra pas être oubliée, chaque tissu régional devant adapter ses compétences en parallèle de l'augmentation de la demande de bâtiments performants.

Le foisonnement d'informations non qualifiées pour les professionnels, majoritairement composé d'artisans

Le foisonnement d'informations non qualifiées rend difficile sa lisibilité et son accès. Cela est d'autant plus le cas au regard de la composition du secteur majoritairement composé d'artisans ne disposant pas des moyens de grands groupes. Cela entraîne une réelle difficulté du tissu de TPE-PME à modifier ses offres et à intégrer les nouveaux services et produits. La mise en place de mesures larges d'accompagnement garantissant l'impulsion d'une dynamique efficace et pérenne, doit permettre de mettre à disposition une information soutenue en privilégiant la lisibilité de la performance énergétique des bâtiments au plus près des particularités socio-économiques du terrain et des types de logements.

La non-diffusion de bouquets de travaux et la non-diffusion d'opérations de diagnostic de qualité

Le développement d'une offre globale autour de bouquets de travaux proposés et portés par des groupes d'éco-artisans permettra à terme la professionnalisation et l'industrialisation des opérations d'amélioration. La diffusion d'opérations de diagnostic menées par des diagnostiqueurs est essentielle pour que les objectifs de rénovation soient atteints et pour que les réalisations les plus performantes soient identifiées. Ces opérations de diagnostic constituent le socle des offres globales pour éviter la succession d'actes d'amélioration désordonnés et inefficaces en privilégiant une planification et un étalement dans le temps et en appréhendant l'ensemble des composantes techniques en fonction de l'opportunité des investissements consentis, compte tenu d'un ratio économique / gains attendus. Lutter contre la précarité énergétique des logements est également un élément clé à prendre en compte.

Des structures de contrôle de la mise en œuvre de la réglementation thermique devront également émerger, notamment au sein des administrations publiques, pour un suivi et un bilan des performances énergétiques et environnementales et pour une résolution des problèmes rencontrés, tels que des défaillances de mise en œuvre, d'intégrabilité des solutions appliquées, etc.

Des procédures administratives encore complexes de qualification et d'assurance des matériaux ou solutions innovantes

Les procédures administratives d'agrément technique freinent encore l'adoption de nouveaux produits et matériaux innovants, ainsi que les problèmes d'assurance engendrant en particulier des difficultés de garantie décennale.

Une intégration du bois-construction inférieure aux objectifs nationaux, du fait d'une difficulté à structurer la filière de récolte de gestion de la forêt française

Il est important de souligner l'intégration inférieure aux objectifs nationaux du bois-construction dans le bâtiment, comme indiqué dans la mission « Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois » confiée à Jean Puech. Malgré l'accord cadre signé par l'État et la profession du bâtiment en mars 2001 (charte bois construction environnement), la part du bois dans la construction stagne à 10 % pour un objectif de 12,5 % en 2010. Il convient de développer progressivement dans la profession le recours au bois dans toutes les constructions, individuelles et collectives, privées ou publiques.

Si le morcellement de la forêt française, ainsi que son statut, freinent l'utilisation du bois comme matériau, il en est de même pour l'inadaptation des normes, d'origine majoritairement scandinave, et l'absence d'essais (essais feu, essais thermiques et acoustiques, travaux de normalisation sur les produits de construction en bois, développement des bâtiments bois à étages multiples, systèmes préconstruits à ossature bois, etc.).

Technologies capacitantes, mais non retenues comme clés

La gestion de l'air dans le bâtiment concerne les systèmes de ventilation et le traitement de l'air (filtration, humidification, rafraîchissement, etc.). Deux objectifs sont recherchés dans l'amélioration de ces équipements : la réduction des consommations énergétiques, le renouvellement de l'air étant à l'origine de déperditions de chaleur et la maîtrise de la qualité de l'air, et l'amélioration du confort des occupants et de leur santé (évacuation des polluants et des germes pathogènes). La gestion de l'air doit préserver les occupants des émissions internes liées à l'utilisation de produits et matériaux et des pollutions externes, grâce à des dispositifs de traitement adaptés en fonction du type de pollutions locales observées.

La gestion de l'air repose sur des technologies existantes et éprouvées. Il s'agit donc d'un enjeu transversal à prendre en compte, tant dans les opérations de réhabilitation que dans le cas des constructions neuves. Le Plan national de santé environnement 2 (PNSE 2) en fixe les éléments essentiels en insistant sur l'insalubrité de certains logements existants.

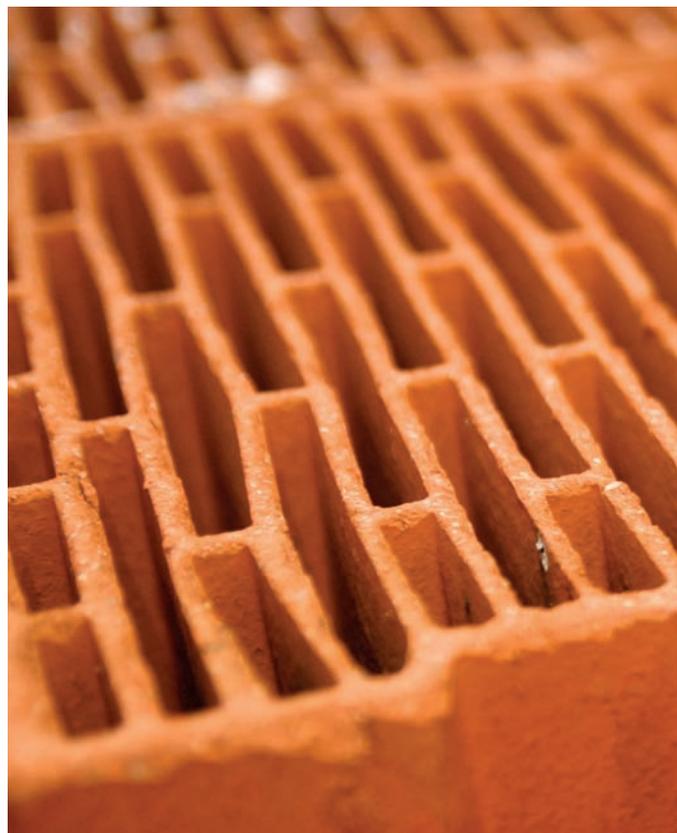
La formation des professionnels est également un enjeu transversal du développement de la filière.

Recommandations

Le bâtiment « à faible impact environnemental » est une filière majeure du Grenelle de l'environnement. Le Plan Bâtiment Grenelle affiche des objectifs ambitieux de réduction de la consommation d'énergie ainsi que des émissions de CO₂. Le MEEDDM l'a par ailleurs considéré dans son étude *Les filières industrielles stratégiques de l'économie verte*, publiée par le CGDD en mars 2010, comme l'une des sept filières prioritaires en termes de politique industrielle, compte tenu du rôle que la France pourrait y jouer et de l'intérêt qu'elle en retirerait en termes de développement économique.

Or, pour s'inscrire dans le long terme, il faut certes s'assurer de la qualité des nouveaux bâtiments, mais également travailler sur l'ensemble du parc existant. Pour y parvenir, les technologies clés liées aux matériaux biosourcés, composites et recyclés, aux TIC et aux ENR doivent être mises à disposition de l'ensemble des acteurs de la filière, par le biais de mécanismes financiers et juridiques. Réorienter les aides publiques vers les solutions les plus performantes énergétiquement, conditionner les aides publiques à l'atteinte des performances énergétiques (par exemple, proposer des subventions supplémentaires pour l'atteinte de performances spécifiques), mettre en place des incitations fiscales pour les rénovations dans le tertiaire, etc. sont autant de propositions qui permettraient d'atteindre ces objectifs.

Les appels à projets dédiés et plateformes de démonstration sont également propices pour soutenir l'essor et l'intégration de



ces technologies, les investissements d'avenir constituant sur ce point une opportunité. Des réflexions doivent également être menées pour soutenir l'intégration de ces technologies dans une logique bâtiment. Cet enjeu d'intégration doit en effet tenir compte des volets ENR, des nouveaux matériaux et systèmes constructifs dans une approche globale du bâtiment construit ou à construire. Ces appels à projet pourraient ainsi permettre de lever des verrous encore existants, d'une part techniques, tels que des verrous de conception, de maîtrise des assemblages, d'optimisation des traitements, de processus de mise en œuvre, etc., mais également réglementaires, notamment pour les normes DTU, le passage à des bâtiments bois allant au-delà du R+1, la mise en place de standards de rénovation, etc. L'intégration des technologies devra être recherchée en privilégiant les problématiques de confort, de santé, de sécurité et de conception architecturale.

La performance énergétique et thermique des bâtiments passe par une première phase de diagnostic, de suivi et d'évaluation. Elle permet d'établir un bilan et un suivi des performances énergétiques et environnementales du bâti dans le but d'améliorer les bâtis existants et de réaliser les bâtis les plus performants. Le développement d'offres globales autour de la réalisation de bouquets de travaux performants est pour cela de première importance car il permettrait de tirer pleinement partie des technologies clés et des services de gestion active des équipements.

La lutte contre le réchauffement climatique et l'indépendance

énergétique passent par une transformation de la filière du bâtiment. Les pratiques professionnelles s'en trouvent profondément modifiées. Afin d'aider les acteurs à mieux se positionner, la mise en place de réseaux ou de groupements locaux doit être incitée. Cela passe notamment par la création de centres d'excellence consacrés aux technologies clés et à leur intégration. Au-delà des aspects technologiques, ces mutations doivent également s'appuyer sur des dispositifs de formation et des supports pédagogiques adaptés, tels que des plateformes technologiques en lien avec les industriels et les professionnels de la filière. Comme précédemment indiqué, il est nécessaire de rapprocher la formation des lieux de réalisation (par exemple, visites de chantiers mettant l'accent sur les technologies et équipements clés) et de démonstration. La filière des installateurs-diagnostiqueurs doit également faire l'objet d'une attention particulière, par exemple en certifiant les solutions de rénovation thermique les plus performantes et/ou les entreprises elles-mêmes pour leur capacité à déployer des technologies clés, tant dans la construction que dans l'existant. De plus, un plan de formation spécifique doit être lancé afin de couvrir les besoins pour les jeunes qui intègrent la filière sans bagage spécifique. Les formations continues doivent être proposées en plus grand nombre, l'extension du dispositif Feebat étant l'une des options possibles. Notons que ces évolutions ne pourront se faire qu'à la condition de créer le vivier de futurs enseignants. Enfin, les TIC doivent être intégrées aux besoins de formation, en développant des outils de *e-learning* et des centres de ressources en ligne.





70. Systèmes d'enveloppe du bâtiment



Description

L'enveloppe du bâtiment constitue l'interface avec l'extérieur. Elle englobe les murs, les planchers, les ouvrants, ainsi que la toiture et joue un rôle majeur dans la performance énergétique du bâtiment. À travers des paramètres tels que l'isolation, l'étanchéité à l'eau et à l'air, la gestion des apports solaires ou encore l'inertie, les systèmes d'enveloppe du bâtiment permettent une meilleure efficacité énergétique.

À titre d'exemples, les façades actives, les murs solaires, le vitrage sous vide, les toitures rafraîchissantes, etc. permettent une réduction des besoins énergétiques. L'isolation thermique par l'extérieur (ITE) apporte également une économie d'énergie en créant une enveloppe globale protectrice autour de la construction permettant de traiter les déperditions de chaleur au niveau des façades et des ponts thermiques.

Aux aspects énergétiques s'ajoutent les fonctionnalités nouvelles qu'ils peuvent intégrer. Les façades peuvent devenir intelligentes en s'adaptant à l'environnement extérieur, afin d'offrir davantage de confort à leurs occupants (isolation, confort d'été ou acoustique par exemple). Ainsi, les façades autonettoyantes ou les vitrages électrochromes sont autant d'exemples de développements possibles conduisant à une réduction des pertes énergétiques.

Applications

Les systèmes d'enveloppe concernent de manière prioritaire l'ensemble des nouveaux bâtiments du secteur résidentiel (individuel ou collectif) et du secteur tertiaire dans un contexte où le Plan Bâtiment Grenelle prévoit que tous les nouveaux bâtiments soient à « basse consommation » (BBC) d'ici à 2012 et à « énergie positive » (Bepos) d'ici à 2020 [11].

Ils concernent également la réhabilitation des bâtiments anciens, le parc existant représentant 29,7 millions de logements [11].

Enjeux et impacts

L'évolution réglementaire du Grenelle de l'environnement et les défis énergétiques actuels poussent au développement de nouveaux systèmes d'enveloppe. C'est en effet grâce à la rénovation des bâtis existants que la France réussira à atteindre ses objectifs et cette réhabilitation passe par les systèmes d'enveloppes.

Le principal impact attendu est de nature environnementale. Les nouveaux systèmes d'enveloppe doivent permettre de réduire la consommation énergétique de 38 % et les émissions de gaz à effet de serre de 50 % d'ici à 2020 [11]. Ces objectifs varient selon la zone climatique ou le type de locaux concernés (logement, école, bureaux, etc.).

L'impact économique espéré est également non négligeable : le coût de la facture énergétique devrait ainsi s'en trouver réduit.

La mise en place de systèmes d'enveloppe performants nécessite cependant une formation spécifique des professionnels, notamment pour l'intégration de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. L'Ademe œuvre ainsi avec les centres de formation et de conseil à adapter le tissu actuel de formation.

Si l'optimisation du bâtiment et de son enveloppe doit prendre en compte plusieurs critères, le prix des nouvelles constructions est également à considérer car il constitue potentiellement un frein en termes d'acceptabilité : le surcoût d'un bâtiment BBC est estimé à 10 % par rapport à celui d'une construction traditionnelle.

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Structures relais** : Advancity, Cerib, Cerma, CSTB, Derbi, FCBA, Fédération Française du Bâtiment, Pôle Fibres Grand Est, Xylofutur
- **Intégrateurs** : Arcelor, Bouygues Construction, Imerys, Lafarge, Materis, Roofing, Saint-Gobain, Vinci Construction
- Concerne aussi bien les fabricants d'isolants que les fabricants d'éléments de construction (briques, éléments de parois, etc.) et de menuiserie

Principaux acteurs étrangers

- Nippon Steel, Posco (Corée), JFE (Japon), Boosteel (Chine), Nucor, Riva, Tata-Corus, Thyssen Krupp, US Steel

Position de la France

La France est très bien positionnée avec la présence d'acteurs internationaux, notamment dans la fabrication de vitrages ou de produits pour la façade et la toiture. De nombreuses opportunités existent donc pour créer des filières sur des technologies innovantes (certains citent l'isolation en couche mince).

Analyse AFOM

Atouts

Fortes compétences d'acteurs français à dimension internationale.

Faiblesses

Fragmentation du tissu d'entreprises ; manque de formation spécifique sur les systèmes d'enveloppe ; manque d'offres en prestation globale.

Opportunités

Position de leader à prendre, notamment sur les systèmes d'isolation en couche mince ; opportunité de créer un « intégrateur » de taille internationale.

Menaces

Surcoût engendré par les constructions BBC.

Recommandations

Afin de répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement pour l'existant, des technologies doivent être développées de sorte à être intégrées au bâti. Or, l'installation d'équipements n'est pertinente que dans la mesure où

l'isolation est performante, les installateurs devant s'assurer en premier lieu de ce prérequis. Il est donc crucial de développer une offre adaptée et de structurer un réseau d'entreprises capable de proposer une offre globale, par exemple par le biais d'appels à projets régionaux, chaque artisan devant avoir conscience de l'importance de l'isolation par l'extérieur et des systèmes d'enveloppe adaptés.

Des leviers économiques et financiers doivent être mis en place pour assurer la pérennité économique de la rénovation. Concentrer les dispositifs incitatifs (TVA réduite, subventions, etc.) sur les systèmes d'enveloppe les plus performants peut être un levier, en particulier pour le tertiaire où la pénétration peut être plus facile.

De plus, même si les systèmes d'enveloppe sont diffusants, de nouveaux matériaux minces et plus performants restent encore à développer. Il faut donc encourager les investissements dans la filière et renforcer l'accessibilité aux dispositifs d'appui à l'innovation. Le renfort des solutions de transferts vers le tissu de TPE-PME est clé. Concernant la formation, l'enjeu prioritaire est d'adapter les cycles existants aux besoins des professionnels. Dans un deuxième temps, de nouveaux cycles de formations peuvent être développés, tels que des formations sur le montage des nouveaux isolants par exemple.

Avec la présence de leaders mondiaux du secteur du bâtiment, la France est très bien positionnée pour faire émerger un grand acteur des systèmes d'enveloppe et des matériaux innovants. Une riche stratégie de coopération et de partenariat entre les entreprises et les pôles de compétitivité notamment doit être encouragée : engager un grand programme commun et encourager la création de plateformes démonstratrices, capables d'assurer la passerelle entre le monde de l'innovation et le tissu d'entreprises.

Par ailleurs, les systèmes d'enveloppe doivent être envisagés sous l'angle du couple équipements – systèmes passifs. Aujourd'hui, peu d'acteurs sont positionnés sur de tels équipements, alors qu'il existe un potentiel fort de développement. Cette filière doit donc être soutenue par le biais d'appels à projets spécifiques, permettant de soutenir une démarche partenariale forte, ou encore par le biais de la promotion de labels pour les systèmes d'enveloppe à haute efficacité.

Enfin, la mise en place d'une réglementation précise sur les systèmes d'enveloppe performants permettrait de favoriser le développement de nouvelles technologies, ainsi que leur intégration aux autres technologies clés : orientation des crédits d'impôts aux systèmes d'enveloppe les plus performants, subvention supplémentaire pour l'atteinte de performances spécifiques, etc.

Liens avec d'autres technologies clés

7

11

40

72

74

75

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



71. Systèmes constructifs

Description

L'éco-construction a pour but la construction de bâtiments dans le respect du développement durable, c'est-à-dire en consommant le moins d'énergie possible et en minimisant l'impact environnemental.

Le bâtiment préconstruit est généralement conçu à partir d'un plan en trois dimensions permettant de composer des modules fabriqués en usine et directement montés à l'emplacement final du bâtiment. Ces modules peuvent être par exemple des pré-planchers ou des pré-murs. Le bâtiment préconstruit fait actuellement majoritairement appel au béton et au matériau bois. Le bois fait également partie des modes constructifs associés à l'éco-construction.

Applications

Les systèmes constructifs s'intéressent à l'ensemble des éléments de la conception du bâtiment : conception architecturale, orientation, positionnement des ouvertures, traitement de l'isolation, du chauffage, matériaux utilisés, etc. Ils constituent ainsi une voie de développement essentielle dans la recherche de la performance énergétique du bâtiment.

Le système constructif doit s'envisager dans la globalité du bâtiment afin d'adresser l'ensemble de ses problématiques. Il doit ainsi faire le lien avec l'ensemble des éléments constitutifs du bâti : les matériaux utilisés (notamment les matériaux biosourcés, composites et recyclés), les systèmes d'enveloppes ou encore l'interaction entre les fluides et le bâti. L'utilisation de la maquette numérique permettrait par ailleurs de prendre en compte ces éléments dans le but de déterminer le système constructif approprié.

Jeux et impacts

Les enjeux des systèmes constructifs sont majeurs car leur choix a un impact direct sur la consommation énergétique. Bien orienter le bâtiment, intégrer les matériaux innovants, renforcer l'isolation de l'enveloppe ou utiliser un type de chauffage à énergie renouvelable sont autant d'actions possibles afin de maximiser la performance thermique. Construire les modules en usine avant de les assembler sur l'emplacement final permet de plus de réaliser des chantiers secs (sans eau), de limiter les transports d'engins de chantier, mais également de diminuer les déchets de construction ou encore de permettre la valorisation des coproduits (par exemple en optimisant les chutes de bois récupérées en atelier).

Il subsiste néanmoins des freins au développement des systèmes constructifs. Le préconstruit est un domaine qui n'a pas encore pris son essor en France et attire peu

les investissements. En termes d'acceptabilité, il ne bénéficie pas d'une bonne image de qualité auprès des consommateurs.

Par ailleurs, le choix du système constructif repose sur l'ensemble des corps de métier du bâtiment et nécessite donc une réelle interdisciplinarité. Enfin, le préconstruit s'adresse davantage aux projets de large envergure, tels que la construction de zones pavillonnaires.

Dans le cas des systèmes constructifs bois, d'autres verrous spécifiques sont à adresser : l'expression architecturale doit être adaptée à ce matériau et les caractéristiques spécifiques du bois (assemblage, acoustique, feu, etc.) doivent être intégrées dès la conception.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **Structures relais** : Advancity, Cerma, CSTB, Derbi, FCBA, FFB, Pôle Fibres Grand Est, Prebat, Xylofutur
- **Intégrateurs** : BCM, Bodard Construction, Bouygues Construction, CHRYSO, Lafarge, Parexlanko, Saint-Gobain Weber, Solfab, Vinci construction, Yves Cougnaud

Principaux acteurs étrangers

- Beijing DCTH Steel Structure Science and Technology (Chine), Topsider Building Systems, Method Homes (États-Unis)

Position de la France

La position de la France est moyenne même s'il existe un bon savoir-faire dans l'ossature métallique et la maîtrise du béton.

Plusieurs PME innovantes, à l'image de Bodard Construction, cherchent à améliorer les modes constructifs, notamment dans le domaine du préconstruit. Bodard construction a ainsi été l'une des premières entreprises françaises à réaliser des maisons modulaires en 2008.

Toutefois, la France est très en retard par rapport à certains pays d'Europe occidentale (et notamment l'Italie), aux pays scandinaves (Danemark en particulier) ou aux États-Unis. Ceux-ci s'intéressent de près aux systèmes constructifs car ils sont confrontés à l'obligation d'améliorer les performances thermiques de leurs constructions neuves.

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



Liens avec d'autres technologies clés

11

40

70

72

73

Analyse AFOM

Atouts

Bon savoir-faire dans l'ossature métallique et la maîtrise du béton ; initiatives de PME innovantes ; ressource bois disponible et croissante en France.

Faiblesses

Peu d'acteurs industriels et académiques ; manque de coordination entre les corps de métier impliqués ; faible valorisation du bois : un potentiel « dormant » ; taux de pénétration du bois encore faible ; absence de structuration et d'industrialisation de la filière bois ; manque d'outils d'ACV pour le bois.

Opportunités

Valorisation du bois par la mise au point de systèmes constructifs dédiés ; création de valeur et d'emplois locaux.

Menaces

Forte concurrence, notamment de pays d'Europe occidentale et des États-Unis ; forte concurrence de pays d'Europe du Nord sur l'exploitation du bois à visée habitat et systèmes constructifs.

Recommandations

Si le béton possède des avantages certains, tels que sa flexibilité, son étanchéité et son coût, et s'il n'est pas question de le remplacer, la filière des systèmes pré-construits peut trouver une place, en particulier s'agissant du bois.

De plus, l'innovation ouvre la porte à de nouvelles opportunités en proposant des produits et matériaux à plus forte valeur ajoutée (finitions sans solvants, structures

plus résistantes, isolants thermiques réversibles, etc.) et offre la possibilité de se tourner vers de nouveaux marchés pour la substitution de produits issus de la pétrochimie et l'intégration des ENR dans le bâtiment existant et neuf. Le développement de la filière construction bois est par ailleurs fortement lié au préconstruit, ce dernier pouvant ainsi apporter une réelle valeur ajoutée à l'usage du bois.

Ainsi, une structuration de la filière des systèmes constructifs impliquant à la fois bois, acier et béton est nécessaire. Pour cela, des leviers économiques et financiers doivent être engagés, notamment par le biais d'appels à projets spécifiques, de plateformes de démonstration dédiées, voire de création d'un cluster spécifiquement dédié à la valorisation du bois à destination des systèmes constructifs, etc.

Une mise à niveau réglementaire pour les systèmes constructifs à base de bois est nécessaire, en soutenant leur adaptation aux normes de construction, principalement sur les futures réglementations (notamment, les RT 2012 et RT 2020), ainsi que les normes DTU. Le passage à des bâtiments au-delà de R+1 devra également être visé. Un lien fort avec les organismes intervenant dans la normalisation est nécessaire. Un fonds de soutien aux petites entreprises pourrait être créé pour assurer les qualifications et leur permettre de lever les verrous réglementaires.

Enfin, des campagnes d'information permettraient de mettre en valeur la filière du préconstruit et de l'éco-construction en sensibilisant l'ensemble des consommateurs (entreprises et grand public) et en lançant une dynamique. De telles campagnes devraient également cibler le bois, afin de permettre son essor en France sur la maison individuelle.

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



72. Matériaux biosourcés, composites et recyclés

Définitions

Les matériaux biosourcés sont issus de ressources renouvelables obtenues à partir de biomasse (chanvre, lin, bois, etc.), ou de matériaux issus du recyclage (ouate de cellulose, fibres de bois, etc.). Ils peuvent être incorporés, pour tout ou partie au sein de matériaux composites et se substituer en partie à leur composante d'origine pétrochimique. Un matériau composite est défini par l'assemblage d'au moins deux matériaux n'ayant pas les mêmes fonctions, ni les mêmes natures. Les applications des matériaux composites sont nombreuses et d'utilisation courante, en particulier dans les transports (aérien, maritime et ferroviaire) et la construction (respectivement 28 % et 27 % du marché total des composites [12]).

Description

Les matériaux biosourcés présentent l'opportunité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de stocker du carbone. Les matériaux recyclés valorisent quant à eux des déchets non valorisés, tels que les déchets issus de la déconstruction. Toutefois, ce type de valorisation est embryonnaire sur le plan économique, le nombre de bâtiments déconstruits étant, par exemple, encore bien moins élevé que le nombre de bâtiments construits et la part des matériaux recyclés provenant de la déconstruction, encore anecdotique. Du fait des initiatives locales, l'utilisation des matériaux biosourcés ou recyclés connaît actuellement un engouement certain. Le bois et ses coproduits, utilisés dans les systèmes constructifs sous différentes formes (panneaux de fibres de bois, bois construction ou bois composite), sont l'illustration de cette tendance et représentent un potentiel non négligeable de création de valeur et de développement de filières courtes.

Applications

Si les matériaux biosourcés trouvent de nombreuses applications dans le bâtiment, notamment pour l'isolation, la plupart ne représente aujourd'hui que des marchés de niche : les isolants biosourcés ne représentent ainsi que 2 % du marché des isolants [12]. Les développements dans le secteur sont pourtant en pleine effervescence : produits tels que le béton de chanvre de plus en plus utilisés en éco-construction ; plusieurs isolants biosourcés sous avis technique (AT) et/ou certification Acermi (Association pour la certification des matériaux isolants), etc.

Le bois construction continue sa progression même si la part du bois dans la construction reste inférieure à l'objectif fixé pour 2010 (10 % contre 12,5 % fixés) [13]. Le Grenelle de l'environnement adresse spécifiquement ce sujet en proposant d'adapter les normes de construction au bois, d'augmenter le taux minimum d'incorporation de bois dans la construction et de favoriser la mise en place d'un label.

Enjeux et impacts

Les enjeux des matériaux composites à base de matériaux biosourcés sont environnementaux dans la mesure où ces matériaux sont renouvelables, contribuent à la réduction de l'effet de serre et représentent une opportunité de substitution aux produits d'origine pétrochimique. Les enjeux sont ensuite économiques. En effet, l'utilisation de ressources locales présente l'opportunité de créer des filières courtes, favorisant la création d'emplois locaux et répondant ainsi à une forte demande du grand public.

S'agissant de l'utilisation des matériaux biosourcés dans la construction, la DGALN a lancé un groupe de travail afin d'identifier les freins et les actions pour les surmonter. Celui-ci réunit les organisations professionnelles représentatives de la filière et doit rendre ses conclusions fin 2010.

Le secteur du bois construction nécessite de plus la mise en place de normes, l'institut FCBA et l'Afnor y travaillant. Les conflits d'usage (alimentation, agrocarburants...), la formation des professionnels, ainsi que le coût engendré par l'utilisation de matériaux biosourcés dans l'éco-construction sont par ailleurs de réelles préoccupations. En outre, des verrous technologiques restent à adresser : résistance au feu, à l'humidité, aux attaques des insectes et moisissures, etc.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : CNRS, Critt Bois, CSTB, FCBA, FNB, Inra
- **Structures relais** : Afcobois, Alsace Energivie, Capeb, CNDB, CRITT Bois, FFB, Pôle Fibres Grand Est, Iar, Maud, U-TEX, UNSFA, Untec, Xylofutur
- **Intégrateurs/Utilisateurs** : AFT Plasturgie, Bouygues Construction, Charpentes Houot, Dorean, Ecologgia, Gico Constructeur, Gross Charpentes, nrGaïa, Saint-Gobain, Weiss France

Principaux acteurs étrangers

- Nexwood (Canada), Timbertech, Trex (États-Unis)

Position de la France

Ce secteur étant hétérogène, il n'est pas aisé d'en décrire une position française. De nombreuses initiatives locales tentent actuellement de valoriser la biomasse au sein du bâtiment. Celles-ci présentent l'intérêt de créer de l'emploi local et sont également poussées au niveau national par l'Ademe qui soutient fortement le développement de matériaux performants, d'un point de vue technique et de coût. Concernant les matériaux recyclés, ils ne pourront se développer sans que la France ne crée de manière générale des filières locales de recyclage, sources d'emplois locaux, un important retard de structuration devant être soulevé vis-à-vis d'autres pays.

Si de nombreuses initiatives existent en France (création de PME innovantes, telles qu'nrGaïa, développements importants d'AFT Plasturgie pour la valorisation, etc.), elle reste en retard par rapport aux pays les plus avancés, notamment scandinaves, en termes d'intégration.

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



Pour la valorisation du bois et de ses co-produits, elle reste fortement en retrait, alors qu'elle possède la troisième forêt européenne [13].

Analyse AFOM

Atouts

Ressources agricoles et forestières du territoire ; multiples initiatives de valorisation de la ressource agricole ; PME innovantes ; présence d'acteurs académiques de dimension européenne et de structures de transfert dédiées.

Faiblesses

Cadre réglementaire non adapté ; absence de bases de données partagées qui rend difficile la comparaison des analyses de cycle de vie ; verrous techniques encore à lever ; qualification de la performance coûteuse ; problème d'assurabilité (garantie décennale) ; manque de structuration de la filière.

Opportunités

Évolution de la PAC à l'horizon 2013 ; création d'une filière de la déconstruction française ; création d'emplois locaux.

Menaces

Forte concurrence, notamment des pays scandinaves ; dépendance vis-à-vis de savoir-faire et de portefeuilles de propriété intellectuelle étrangers ; manque de diversification des activités agricoles sur des applications à valeur ajoutée.

Recommandations

L'utilisation des matériaux biosourcés, composites et recyclés est aujourd'hui favorisée par des politiques régionales misant sur le développement des filières courtes. Plusieurs leviers sont clés pour son développement : formation, qualification, recherche applicative et industrialisation.

Des formations adaptées, spécifiques et accessibles localement doivent être créées pour soutenir le développement de ces matériaux. La simplification des processus d'évaluation de la performance des matériaux biosourcés est également requise, leur variabilité ne devant pas être considérée comme un frein.

Il est par ailleurs nécessaire d'encourager la création et le développement de PME spécialisées, ainsi que d'accompagner celles désirant se réorienter vers le développement de matériaux biosourcés. Les plateformes techniques et projets démonstrateurs doivent être soutenus.

De plus, il existe un enjeu sociétal non négligeable : la PAC (Politique agricole commune) évoluera à l'horizon 2013 et il sera alors nécessaire de prendre en compte la reconversion de certains emplois ruraux (dans une optique de valorisation des agro-ressources, hors bois) et leur diversification. L'industrialisation de l'amont agricole est donc clé, ainsi que le financement de plateformes de démonstration dans un but de sensibilisation.

La mise à niveau réglementaire est clé, notamment pour résoudre les problèmes de garantie décennale. Un fonds de soutien aux petites entreprises pourrait être créé pour assurer les qualifications de performance et de sécurité de leurs matériaux et leur permettre de lever les verrous réglementaires. Un lien fort avec les organismes intervenant dans les normalisations est nécessaire.

Concernant les matériaux recyclés, une réflexion doit être engagée par les pouvoirs publics afin de lancer des appels d'offre sur la déconstruction, comme cela peut se faire dans d'autres pays, notamment en Suisse.

Liens avec d'autres technologies clés

7

11

37

40

Maturité (échelle TRL)

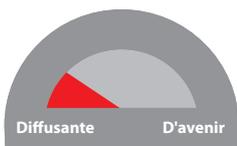
<input type="radio"/>	Émergence (TRL : 1-4)
<input checked="" type="radio"/>	Développement (TRL : 5-7)
<input type="radio"/>	Maturité (TRL : 8-9)

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



73. Maquette numérique

Définitions

eXpert

En réponse à l'appel à projets TIC PME 2010 de la DGClS, les organisations professionnelles de la filière du bâtiment se sont unies pour lancer le projet eXpert. Les partenaires à l'origine du projet regroupent les principaux représentants de la filière du bâtiment : Afnor, AIMCC, BuildingSmart, Capeb, CICF, CSTB, CTAI, IT-FFB, Mediaconstruct, OGE, Unapoc, UNSFA, Untec. L'objectif du projet eXpert est de « soutenir et accompagner les progrès liés aux nouvelles pratiques, grâce au partage, à l'échange, à la normalisation et à la sécurisation des informations techniques sur les projets et les produits industriels, auprès de l'ensemble de la filière et tout particulièrement de sa multitude de PME » [14]. Il s'agit, à terme, de mettre à disposition de l'ensemble des acteurs de la filière des outils mutualisés et appropriés tels que la maquette numérique.

Description

La maquette numérique est la représentation géométrique d'un bâtiment en trois dimensions. Elle permet une gestion rationnelle et cohérente de l'ensemble des informations du bâti (composants, caractéristiques techniques et économiques) et ce, tout au long du cycle de vie (conception, étude, géolocalisation, construction et exploitation). Également appelée *Building Information Modeling* (BIM), la maquette numérique constitue un axe fondamental du bâtiment.

La maquette numérique respecte une norme mondiale : *Industry Foundation Classes* (IFC). Ce format informatique standardisé a été mis en place afin de permettre l'interopérabilité des logiciels. Grâce à ce langage commun, les échanges entre les différents acteurs du bâtiment (maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage, etc.) s'en trouvent facilités et toute modification apportée peut automatiquement être répercutée sur l'ensemble du projet.

De plus, la modélisation et la simulation constituent des outils centraux pour anticiper la performance des bâtiments, lors de leur conception et de leur suivi. La maquette numérique jouera donc un rôle essentiel pour la généralisation des bâtiments BBC à l'horizon 2012 et Bepos d'ici à 2020.

Applications

Si la maquette numérique peut être utilisée pour tous types de bâtiments, elle concerne en priorité la conception de nouveaux bâtiments.

Elle intervient sur l'ensemble des étapes du projet : relève de l'existant, modélisation générale, architecture, calcul des structures, analyse et simulation des phénomènes environnementaux et analyse économique.

L'ensemble des acteurs du bâtiment est concerné par son intégration : de la maîtrise d'œuvre (architectes, bureaux d'étude, etc.) jusqu'aux métiers du foncier et de la géolocalisation. C'est néanmoins la maîtrise d'œuvre qui sera la plus impactée. Elle devra faire face à des contraintes supplémentaires liées à la structuration de données communes : plans d'architecte, éléments topographiques, etc.

Jeux et impacts

Le secteur du bâtiment étant fragmenté, chaque corps de métier possède ses propres règles et outils : moyens informatiques et de communication, méthodes de codification et obligations contractuelles sont notamment différents. C'est dans l'optique de remédier à ce manque de standards et à cette hétérogénéité des pratiques et outils que le projet eXpert a par exemple été lancé [14] (voir encadré). Celui-ci a pour but d'harmoniser et de déve-

opper l'usage des TIC, par l'adoption de la maquette numérique et de la norme IFC.

Les impacts de la mise en place d'une maquette numérique standardisée se trouvent d'abord au niveau de la performance : grâce à des systèmes interopérables et favorisant le travail collaboratif, le gain de temps se traduit en gain d'efficacité, de productivité et financier. Par ailleurs, la qualité de l'ouvrage final est grandement améliorée puisque la coordination des différents corps de métiers est assurée de façon pérenne.

De plus, l'aspect énergétique peut être intégré au projet dès sa conception. Les simulations permettent ainsi d'estimer la consommation énergétique ou l'impact environnemental et donc de répondre aux attentes et exigences d'une construction durable.

La maquette numérique ne devra cependant pas se cantonner à l'aspect énergétique, mais bien englober l'ensemble des fonctions d'usages d'un bâtiment sur l'ensemble de sa durée de vie.

Néanmoins, plusieurs freins subsistent. Bien qu'attrayante, la conception en trois dimensions reste difficile à mettre en œuvre au sein des entreprises. Elle requiert en effet un investissement financier, un investissement en personnel et en temps importants et elle pose de plus la question du partage de la responsabilité.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : Centre de Recherche en Gestion (CNRS), CSTB, Irex, LCPC, Université de Marne-la-Vallée
- **Structures relais** : Ademe, Advancity, Afnor, AIMCC, BuildingSmart, Cap Digital, Capeb, CICF, CTAI, Derbi, Edibatec, IT-FFB, Mediaconstruct, Ordre des géomètres-experts, Puca, Unapoc, UNSFA, Untec
- **Intégrateurs** : Abvent, All Systems, Attic+, Autodesk, BBS Slama, Bentley, Gehry Technologies, Graitec, Groupe Archimen, Nemetschek, RasterTech, Tekla, Vizelia
- **Utilisateurs** : Bouygues Construction, Eiffage, Vinci Construction, bureaux d'études, cabinets d'architectes, artisans

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Position de la France

La France est bien positionnée du fait de ses fortes compétences de recherche. Plusieurs organismes, tels que la FFB ou la branche française de BuildingSmart, encouragent de plus l'adoption de standards. Par ailleurs, plusieurs éditeurs tels qu'Abvent, Autodesk ou RasterTech ont rapidement adopté la norme IFC.

La France est donc dans le groupe de tête au niveau européen, les pays scandinaves manifestant également un intérêt croissant pour cet outil.

Analyse AFOM

Atouts

Compétences fortes en modélisation ; initiatives d'acteurs, plusieurs éditeurs ayant par exemple adopté la norme IFC ; implication des industriels ; structures favorisant l'adoption de standards : FFB, branche française de BuildingSmart.

Faiblesses

Faibles investissements des acteurs français ; difficultés pour le tissu de TPE-PME d'acquisition de ce types d'outils sur le plan financier ; manque de formations adaptées.

Opportunités

Atout en termes de performances économiques comme énergétiques ; intégration de la traçabilité et des enjeux de recyclage dès les premières étapes de conception.

Menaces

Forts développements dans les pays avancés en matière de bâtiment à moindre impact environnemental pour développer de nouveaux outils ; manque d'outils pertinents pour les systèmes constructifs, notamment à base de bois, limitant de fait son essor.

Recommandations

Si les industriels ont déjà intégré la logique de la maquette numérique, l'impulsion à l'essor de cette filière doit en premier lieu provenir de la maîtrise d'ouvrage. En effet, certains outils existent d'ores et déjà, mais restent peu utilisés par les cabinets d'architectes, du fait de la lourdeur d'investissement en personnels compétents et en logiciels 3D.

Les pouvoirs publics doivent s'interroger plus largement sur les conditions d'adoption de ce type d'outils, au regard de la fragmentation du tissu et de l'absence d'acteurs supportant son utilisation et la diffusant. Des aides financières spécifiques pourraient être envisagées pour résoudre ce point clé.

Par ailleurs, bien que l'ANR soutienne les initiatives lancées dans ce secteur, les investissements soutenant le développement de logiciels restent insuffisants. Il est donc nécessaire de favoriser la création et le soutien de projets portant sur la maquette numérique, par exemple par l'insertion de lignes dédiées dans les appels à projets. Ces appels à projets devront également être déclinés pour les systèmes constructifs bois, afin de soutenir l'essor de cette filière par des systèmes de modélisation et de conception adaptés.

De plus, et afin de simplifier les échanges entre les multiples acteurs impliqués, des plateformes collaboratives de test « open source » doivent être financées pour favoriser une utilisation interdisciplinaire.

Afin de répondre à la diversité des compétences requises, des formations adaptées doivent être proposées au sein des écoles d'ingénieurs et des écoles d'architecture. Enfin, il semble pertinent de poursuivre le soutien de l'action de BuildingSmart en France, ainsi que les plans d'actions favorisant l'utilisation des TIC dans le bâtiment.

Liens avec d'autres technologies clés

20

28

29

71

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



74. Comptage intelligent

Définitions

Le comptage intelligent consiste en la mise en réseau de fonctions clés liées au bâti (ventilation, chauffage, fluides, etc.), par la mise en place de capteurs, actionneurs et logiciels. Il consiste en une approche globale tenant compte de l'ensemble des flux gérés dans le bâtiment : électricité, gaz, eau, air, etc. Il s'agit de compteurs communicants, capables de recevoir et d'envoyer des données sans intervention humaine, pour la mesure et la gestion des flux. De tels compteurs permettent de suivre en temps réel la consommation énergétique d'un bâtiment, foyer ou entreprise.

Description

Les avantages majeurs du comptage intelligent résident dans la maîtrise de la dépense énergétique et l'établissement de la facture client sur la base de sa consommation réelle et non de sa consommation estimée. De nouvelles offres et de nouveaux services peuvent de plus être proposés par les grands énergéticiens, permettant par exemple d'échelonner la consommation. Le comptage intelligent peut ainsi être un outil de contrôle permettant une meilleure maîtrise des flux et de ce fait limitant par exemple les pertes et les pannes de réseau. L'enjeu majeur reste la diminution de la quantité de capteurs présents dans le bâtiment tout en les optimisant. Pour cela, les capteurs doivent être robustes, étalonnés et fiables.

Applications

Si le comptage intelligent renvoie le plus souvent aux compteurs d'électricité, il peut également concerner les compteurs d'eau et de gaz. En France, 35 millions de compteurs électriques sont actuellement en fonctionnement. L'Union européenne ayant demandé aux pays membres d'expérimenter le dispositif, ErDF, principal distributeur français, a lancé en 2007 le projet Linky, qui sera déployé en une dizaine d'années. ErDF a ainsi prévu l'installation de 250 000 compteurs en Indre-et-Loire et dans l'agglomération lyonnaise en 2010. Si l'expérience se révèle concluante, les compteurs intelligents se déploieront sur le territoire entre 2012 et 2017 [15].

Le moteur de l'industrie du comptage intelligent réside dans l'électricité et il n'est, à l'heure actuelle, pas prévu d'expérimentation au niveau national pour l'eau et le gaz, même si plusieurs industriels indépendants proposent leurs services pour le suivi de ces consommations. Notons également que la mise en place de compteurs intelligents, quelque soit le fluide considéré, nécessite des technologies avancées. Ceci implique de remplacer les compteurs actuels, rallongeant ainsi les temps de déploiement et augmentant les coûts associés au comptage intelligent.

Notons également qu'il existe enfin une opportunité de coupler l'infrastructure énergétique du bâtiment aux véhicules électriques. Dans une telle configuration qu'il conviendra de définir, les nouveaux bâtis pourraient ainsi intégrer des prises nécessaires à la recharge de ces véhicules.

Enjeux et impacts

L'enjeu majeur du comptage intelligent réside dans les économies potentielles engendrées, de l'ordre de 5 % à



15 % [15]. La réduction de la facture pour le particulier ou l'entreprise devrait ainsi être supérieure à l'investissement requis pour l'installation (entre 12 et 24 euros par an pendant dix ans [15]).

En termes d'acceptabilité, le problème de l'atteinte à la vie privée est soulevé par plusieurs associations de consommateurs. La question de la rétention des données doit donc être traitée de manière attentive.

Enfin, les dispositifs existants ne permettent pas encore un accès direct à la consommation, ni par l'utilisateur, ni par l'agent de relève. Un intermédiaire (outils complémentaires ou agents de relève) doit donc intervenir afin de transmettre les informations relatives à la consommation.

À ces problématiques de transmission de données, s'ajoutent des problématiques techniques qu'il reste à résoudre afin d'atteindre une fiabilité maximale et éviter les dysfonctionnements.

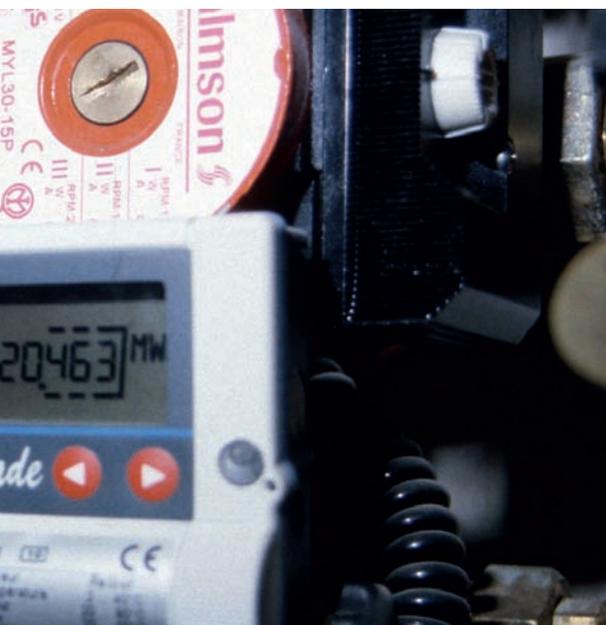
Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA, CSTB
- **Structures relais** : S2E2
- **Intégrateurs / Utilisateurs** : Aergy, Atos Origin, Domtis, Edelia, Effineo, Enerdis, ErDF, Gaz de France, Google Power Meter, HomeRider Systems, Ijenko, Ista, Legrand, Poweo, Sinovia, Sierra Wireless, Schneider Electric, ST Microelectronics, Vizelia, Voltalis, Wirecom Technologies

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



Position de la France

Le comptage intelligent s'applique aujourd'hui essentiellement aux compteurs électriques. Si la France est bien positionnée dans ce domaine avec l'expérimentation actuellement menée, d'autres pays l'ont néanmoins précédée. Ainsi, l'Italie a été pionnière en étant le premier pays intégralement équipé de compteurs électriques intelligents. Le déploiement a débuté en 2000 et s'est achevé en 2005. Les dépenses énergétiques ont depuis diminué de 5 % par an [16].

De nombreux pays ont ensuite emboîté le pas à l'Italie, notamment la Suède, la Norvège, la Finlande, l'Espagne, l'Allemagne, l'Irlande, les Pays-Bas, le Royaume-Uni, l'Australie, le Canada, les États-Unis et la Turquie. Par ailleurs, l'UE a demandé en 2009 d'expérimenter ce type de dispositifs. L'objectif est de parvenir à équiper 96,3 millions de foyers d'ici à 2014 et près de 80 % de foyers d'ici à 2020 [16].

Analyse AFOM

Atouts

Expertise académique et industrielle reconnue dans l'élaboration de réseaux ; initiatives d'acteurs industriels, tels que le projet Linky d'ErDF.

Faiblesses

Filière peu structurée avec une définition floue du comptage intelligent ; technologies telles que la production décentralisée, non matures ; investissements lourds requis par les potentiels utilisateurs ; manque d'informations vis-à-vis des utilisateurs et d'interface ergonomique adap-

tée pour leur sensibilisation ; pour des raisons culturelles, acceptabilité pour les maisons individuelles.

Opportunités

Volonté forte au niveau européen pour développer le comptage intelligent ; marché potentiel important avec de larges possibilités à l'export ; potentiel de création d'emplois et de création de valeur.

Menaces

Concurrence notamment provenant des États-Unis avec des acteurs d'autres métiers, tels que Google, Cisco, IBM ou Intel, se positionnant déjà avec des projets de large envergure à Miami ou Orlando, etc.

Recommandations

Le comptage intelligent est une composante clé d'une approche globale de l'ensemble des composantes énergétiques du bâtiment. Il s'agit en effet d'une technologie centrale et structurante pour la filière, en particulier du fait de la richesse de services en résultant.

Il est ainsi nécessaire de poursuivre son déploiement et son utilisation. La sectorialisation de son déploiement est pour cela indispensable, en se donnant notamment des objectifs très ambitieux sur le tertiaire pour lequel la pénétration potentielle à court terme peut être plus forte. L'essor de ces technologies pour les maisons individuelles risque d'être plus long, en raison de difficultés sociétales liées à des craintes d'atteinte à la liberté.

Il n'existe pas d'obligation réglementaire incitant le consommateur à mieux gérer sa consommation énergétique. Pour qu'il devienne acteur, il est donc nécessaire d'encourager son éducation et sa sensibilisation par l'organisation de campagnes d'information, la mise en place de dispositifs, tels que les certificats d'énergie, etc.

La solidité, la fiabilité et la pérennité des capteurs sera un enjeu clé pour rassurer le consommateur et ne pas nuire économiquement à l'essor de la filière par le biais de frais d'intervention sur site pour leur remplacement, réparation, etc.

L'interface homme-machine jouera également un rôle clé pour permettre à l'utilisateur un suivi régulier de ses consommations. Des progrès significatifs sont à faire dans ce domaine et sont une condition *sine qua non* à la bonne sensibilisation de l'utilisateur.

Enfin, la mise en place d'une base de données fiable sur la rénovation et la construction neuve de bâtiments aurait à terme pour effet d'améliorer et de piloter de manière pérenne les performances énergétiques d'un bâtiment.

Liens avec d'autres technologies clés

8

16

18

28

31

52

70

Maturité (échelle TRL)

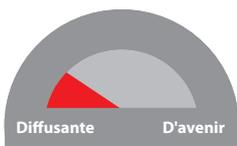
●	Émergence (TRL : 1-4)
●	Développement (TRL : 5-7)
●	Maturité (TRL : 8-9)

Position de la France

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

Potentiel d'acteurs en France

●	Faible
●	Moyen
●	Fort



75. Technologies d'intégration et de mutualisation des ENR dans le bâtiment

Définitions

Les principales sources d'énergie renouvelable sont le soleil (solaire thermique, photovoltaïque), l'air (éolien), le sol (géothermie), l'eau (hydroélectricité) et les forêts (bois énergie).

Le solaire, bénéficiant d'un encouragement de l'État, reste l'ENR la plus utilisée dans le bâtiment.

Sa lumière permet de produire de l'électricité (photovoltaïque) alors que son rayonnement est transformé en chaleur (thermique) afin de chauffer l'eau domestique.

Le bois énergie est quant à lui couramment utilisé pour le chauffage urbain, mais des verrous technologiques liés aux émissions de particules et à la postcombustion, ainsi qu'à l'entretien restent à lever. Les bâtiments n'étant pas tous éligibles, la géothermie sert de source d'énergie d'appoint. De même, du fait de problèmes sociétaux et de questions liées à la maintenance, l'énergie éolienne n'est principalement utilisée que sur des lieux isolés. Les pompes à chaleur regagnent quant à elles de l'intérêt, même si les performances réalisées ne sont pas encore à la hauteur des attentes.

Description

Le bâtiment est en France le secteur le plus consommateur d'énergie et contribue donc de manière importante à l'émission de CO₂ (70 Mtep par an soit 43 % de l'énergie finale totale) [11]. L'utilisation des énergies renouvelables (ENR) dans le bâtiment représente une voie possible pour limiter cette consommation. Ces sources d'énergie peuvent être intégrées physiquement au bâtiment pour permettre la production, voire le stockage de l'énergie. Ainsi, le bâtiment couvrirait ses propres besoins et serait en mesure de distribuer l'énergie non consommée. Par ailleurs, la production pourrait être mutualisée à l'échelle d'un quartier afin de limiter les pics de consommation.

Applications

Les ENR trouvent leurs applications aussi bien dans le tertiaire que dans le résidentiel. Elles concernent principalement la production d'eau chaude (chauffage et eau chaude sanitaire) et d'électricité (pour couvrir ses propres besoins ou pour la revente).

Alors que la production nationale d'énergie primaire s'élève à 137 Mtep, la production d'énergie primaire renouvelable atteint, en 2008, 19 Mtep, en hausse de 12,7 % par rapport à 2007 [11].

Le solaire photovoltaïque connaît une forte croissance mondiale. L'Association européenne de l'industrie photovoltaïque (EPIA) estime que le parc cumulé se monte à 21 000 MWc en 2009. En 2014, ce chiffre atteindrait les 71,7 à 122,7 GWc. En Europe, le marché cumulé est estimé à 14 GWc en 2009 et entre 46,7 et 66,1 GWc d'ici à 2014. La France se situe en cinquième position mondiale avec un parc cumulé de 430 MWc en 2009. Le marché du photovoltaïque dans le bâtiment atteindrait, en France, 13,4 GWc cumulés fin 2020 [17]. Une concertation est en cours avec la puissance publique sur les coûts de ce déploiement.

Le marché du solaire thermique est également en croissance. Le parc solaire thermique installé fin 2008 en Europe atteint 19 982,7 MWth, avec des marchés leaders tels que l'Allemagne [18]. En France, le Plan Soleil de l'Ademe en 1999 a permis d'encourager son utilisation. Le parc cumulé français fin 2008 totalisait ainsi près de 1,9 million de m² installés, soit un équivalent de 1 314 MWth. Il est estimé à plus de 21 millions de m² en 2020 [18].

Les ENR concernent tant le secteur de la rénovation que celui de la construction neuve. Le stock de bâtiment actuel représente plus de 814 millions de m² de bâtiments tertiaires chauffés [11], auxquels s'ajoutent chaque année 14 millions de m² : autant d'opportunités d'intégrer et de mutualiser les ENR au sein du bâtiment [11].

Enjeux et impacts

L'intégration et la mutualisation des ENR dans le bâtiment participent de manière active à la réduction de la consommation énergétique. Les pays industrialisés sont tenus de diviser leurs émissions par quatre ou cinq en moins de cinquante ans, soit une consommation moyenne d'énergie primaire de l'ordre d'une centaine de kWh/m² en 2050 pour l'ensemble des bâtiments en service [11].

De plus, le secteur des énergies renouvelables a de fortes retombées économiques. Ainsi, considérant le fort potentiel de développement du solaire photovoltaïque et thermique en France, près de 120 000 emplois seraient mobilisés d'ici à 2020 [11].

Par ailleurs, la mise en place de standards pour l'intégration des ENR aboutirait à une intégration physique rapide, efficace et sûre.

Certains freins, tels que la disponibilité de la ressource, dans le cas de la biomasse notamment, peuvent néanmoins ralentir leur progression. La formation des professionnels reste également un frein au développement. Par ailleurs, les problèmes de sécurité (notamment pour le photovoltaïque), et d'étanchéité ne sont pas encore résolus. La question de la responsabilité financière est également importante entre les corps de métier. De plus, en termes d'acceptabilité, les coûts d'installation élevés peuvent freiner l'adhésion des consommateurs.

Afin de pallier tout ou partie de ces verrous et ainsi améliorer la rentabilité économique de ces innovations, une rupture technologique est donc nécessaire.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA, Cenerg, Certisolis, Cethyl, Cetiat, Costic, CSTB, GRETh, Ines, Itebe, LNE, Promes
- **Structures relais** : Advancity, Ademe, Afineole, Afpac, Alsace Energivie, Avenia, Capenergies, Cler, CRE, Derbi, Dream, Enerplan, Estif, Fondation pour le Développement des Energies Renouvelables, Observ'ER, S2E2, Technosolar, Tenerrdis
- **Industriels** : Apex BP Solar, CIAT, Clipsol, EDF, Enalsa, Erset, France Géothermie, Photowatt, Poweo, Saint-Gobain, Technibel

Position de la France

La France se situe dans la moyenne des pays européens quant à la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire (7,5 % en 2008 [19]), mais elle reste loin derrière les pays les plus avancés, tels que la Suède, la Lettonie, l'Autriche ou la Finlande. La Suède

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



Liens avec d'autres technologies clés

40

42

48

50

57

70

s'est par exemple fixé comme objectif d'atteindre 49 % de production d'ENR d'ici à 2020, ce taux se montant aujourd'hui à 40 % [16].

Les aides fiscales ont permis de développer la maîtrise des différents usages des ENR dans le bâtiment, particulièrement dans le solaire. L'Ademe a par ailleurs lancé plusieurs programmes, dont le programme « bois énergie 2000-2006 » et le Plan Soleil (lancé en 1999). La France possède par ailleurs le deuxième potentiel éolien européen, ainsi qu'un très bon potentiel solaire. Cependant, ces aides sont focalisées sur les technologies disponibles et non sur les technologies d'avenir.

Analyse AFOM

Atouts

Soutien de la demande par les politiques publiques (Grenelle de l'environnement, aides fiscales, etc.) ; compétences technologiques présentes ; potentiel environnemental favorable, par exemple avec un ensoleillement de 1 200 kWh/m²/an.

Faiblesses

Peu d'acteurs reconnus ; cadre réglementaire rigide et complexe ; manque de main d'œuvre qualifiée.

Opportunités

Marché potentiel important et possibilité à l'export ; création d'emplois ; place pour des acteurs français à l'international (marché mondial encore très fragmenté).

Menaces

Forte concurrence et retard par rapport aux pays européens leaders.

Recommandations

De forts investissements sont nécessaires pour lever les verrous technologiques et espérer un gain de compétitivité. Il sera pour cela nécessaire d'adapter les dispositifs de soutien à l'innovation, notamment par des appels à projets spécifiques. De tels outils permettront également de développer le tissu d'industriels.

Par ailleurs, il existe un réel besoin de mesure et de garantie de la performance. Ces enjeux peuvent être adressés par la mise en place de méthodes de calcul des performances, de standards et de labels français.

L'élaboration de solutions clés en main est également un point déterminant. Le fait de favoriser l'interdisciplinarité avec la création de plateformes mutualisées innovantes et de soutenir les plateformes existantes le permettrait. Enfin, l'enjeu réside dans l'utilisation simultanée de différentes ENR, selon le type de bâtiment considéré, son usage, ainsi que sa localisation géographique : encourager la recherche sur l'intégration simultanée de différentes ENR par le biais d'appels à projets spécifiques et de démonstrateurs dédiés, équipés de capteurs, intégrant les TIC et conçus dans une optique évolutive, permettrait d'y répondre. De tels démonstrateurs permettraient également de prendre en compte les aspects d'usages, de multifonctionnalité, d'esthétisme et de confort, de facilité de mise en œuvre et de gestion, de santé-environnement, ainsi que les notions de coût, etc.

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

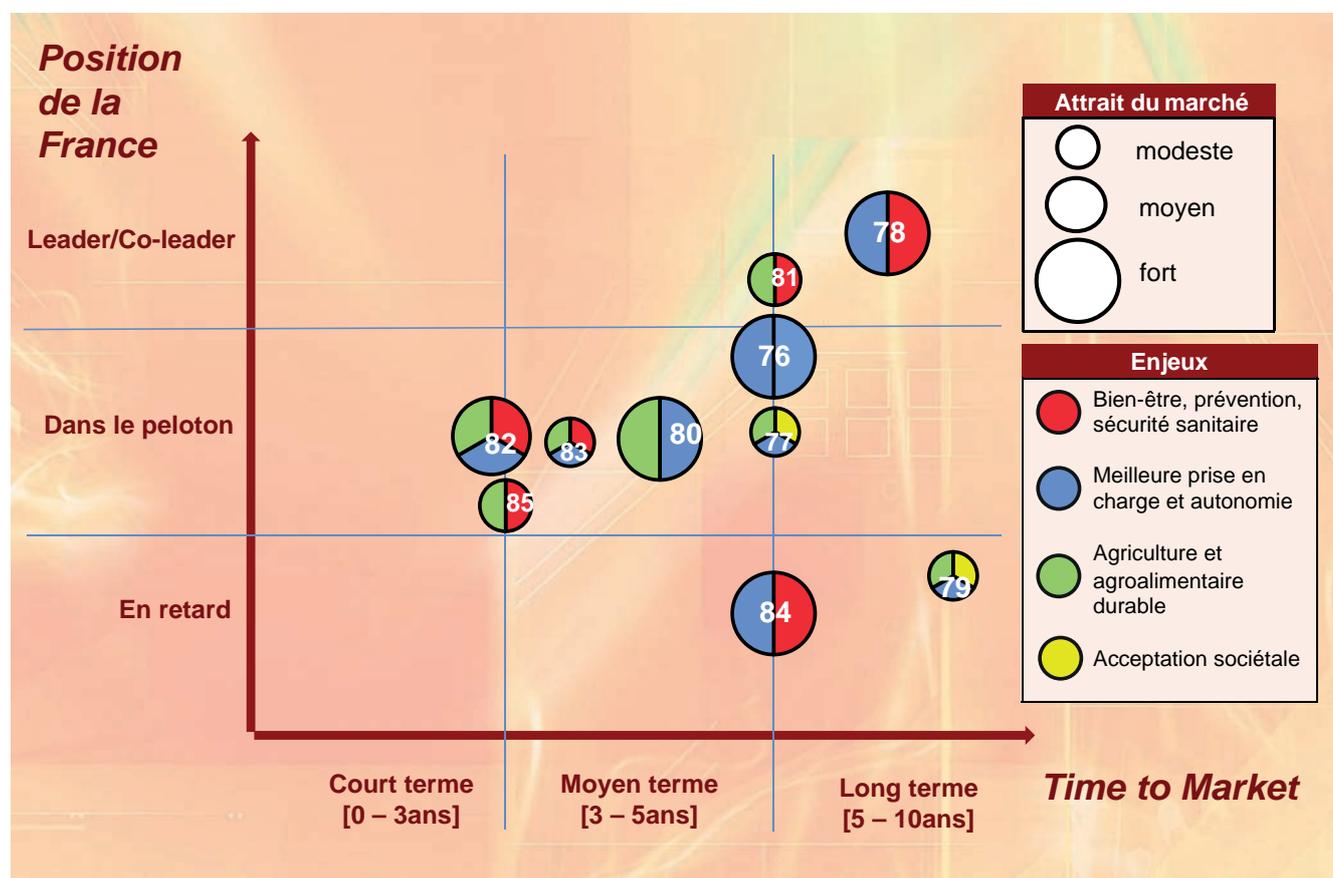
- [1] Capeb d'après Unedic – EAE
- [2] Capeb d'après Sirene au premier janvier 2008
- [3] Estimation Capeb à partir des données 2007 du BAESP
- [4] Artisanat du bâtiment, Capeb, Chiffres clés 2009
- [5] Capeb d'après EAE 2007
- [6] Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Emploi, Sessi, *Les fournisseurs de la construction en chiffres*, édition 2007
- [7] Pelletier, P., Rapport du comité opérationnel *Rénovation des bâtiments existants*, 2008
- [8] MEEDDM, www.developpement-durable.gouv.fr
- [9] Ceren, www.ceren.fr
- [10] The Boston Consulting Group, *Développer les éco-industries en France*, décembre 2008
- [11] Ademe, www.ademe.fr
- [12] JEC Composites, www.jeccomposites.com
- [13] Puech J., *Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois*, 2009
- [14] eXpert, www.projet-expert.com
- [15] Usine nouvelle, www.usinenouvelle.com, d'après Énergie 2007 et le ministère de l'Énergie, 2010
- [16] Euractiv, www.euractiv.com
- [17] Epia, www.epia.org
- [18] Enerplan, www.enerplan.asso.fr
- [19] Insee, www.insee.fr
- IT FFB, *Maquette numérique bâtiment – BIM-IFC*, mai 2009
- MEEDDM, *Etude « filières vertes » : les filières industrielles stratégiques de la croissance verte*, octobre 2009
- Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Emploi, *Les fournisseurs de la construction en chiffres*, édition 2007
- Nth Power & Fraunhofer, *Innovating for better buildings – An opportunity disguised as a meltdown*, octobre 2009
- Pelletier, P., Rapport du comité de filière « métiers du bâtiment », décembre 2009
- Prebat, Ademe, CSTB & Puca, *Comparaison internationale bâtiment et énergie*, décembre 2007
- World Business Council for Sustainable Development, *Energy efficiency in buildings – Transforming the market*, avril 2009
- Xerfi, *Marchés de la rénovation thermique des bâtiments à l'horizon 2012*, janvier 2010



Santé, Agriculture et Agroalimentaire

Santé, Agriculture et Agroalimentaire

- 76. Ingénierie cellulaire et tissulaire
- 77. Ingénierie génomique
- 78. Ingénierie du système immunitaire
- 79. Technologies pour la biologie de synthèse*
- 80. Systèmes bio-embarqués
- 81. Technologies pour la maîtrise des écosystèmes microbiens
- 82. Capteurs pour le suivi en temps réel
- 83. Technologies de diagnostic rapide
- 84. Technologies pour l'imagerie du vivant
- 85. Technologies douces d'assainissement



(*) TC 79 : il s'agit de prévision à cinq ans ; les prévisions sont plus importantes à 10-15 ans.

Contexte et enjeux

Dans le cadre de l'étude, le secteur des sciences du vivant comprend les technologies de la santé, de la cosmétique, de l'agriculture et de l'agroalimentaire, couvrant les besoins des individus de se nourrir et de se soigner. Tous ces domaines sont de forts contributeurs dans la balance commerciale française.

Santé

Les secteurs de la santé peuvent être classés en trois grands groupes :

- les services de santé : l'ensemble des services de santé et de soin fournis à la population ;
- les produits de santé : l'ensemble des produits visant à maintenir la bonne santé de la population ou à traiter des personnes souffrantes. Ces produits sont issus des industries de santé ;
- les services de support à la santé : l'ensemble des services n'ayant pas directement trait au système de soin mais visant à supporter les services et les produits de santé.

Parmi ces secteurs, les produits et services générateurs de développement économique pour les entreprises figurent ci-dessous.

Services de santé et de bien-être	Services sociaux pour la santé	• Soins à domicile
	Dispositifs médicaux	• Industrie des dispositifs médicaux
Produits de santé et de bien-être	Produits pharmaceutiques	• Industrie pharmaceutique • Synthèse d'ingrédients pharmaceutiques actifs • Homéopathie
	Alimentation santé	• Industrie des compléments alimentaires • Industrie des aliments fonctionnels
	Cosmétique	• Parfums • Produits de toilette
Services de support	Services à l'industrie pharmaceutique	• Grossistes répartiteurs • Contrat Research / Manufacturing Organizations (CRO/CMO) • Autres (sociétés de conseil par exemple)
	Prise en charge	• Assurance publique • Assurances privées • Fonds d'investissement • Fonds de pension
	E-Santé	• Industrie de la e-santé

Les industries de santé se partagent en deux domaines : d'une part, celles qui développent et commercialisent des produits pharmaceutiques de base et des médicaments, d'autre part, celles qui élaborent et commercialisent des dispositifs médicaux. Elles réalisaient en 2008 un chiffre d'affaires mondial de 716 Md€ [1, 2]. En Europe, la balance commerciale des industries de santé est fortement positive avec 34,8 Md€, dont 29 Md€ pour l'industrie pharmaceutique et 5,8 Md€ pour l'industrie des dispositifs médicaux [3].

Produits de santé : produits pharmaceutiques

Chiffres clés des industries de la pharmacie

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises de 20 salariés et plus
Fabrication de produits pharmaceutiques de base	1,90	7,7	23
Fabrication de médicaments	42,3	89,4	191
Fabrication d'autres produits pharmaceutiques	2,2	11	36
Total pour les industries de la santé	46,4	108,1	250

Le marché mondial du médicament atteint 550 Md€ en 2008 [5] et connaît un taux de croissance entre 5 et 7 % sur la période 2006-2008, notamment du fait de l'augmentation rapide du niveau de vie dans les pays émergents et de l'exigence croissante de la population quant à la qualité de sa prise en charge. Le marché européen représente 32 % de ce marché. La France a quant à elle généré un chiffre d'affaires de 50 Md€ (prix fabricants HT) en 2009, soit une progression de 7,7 % en deux ans [1, 4]. La France est ainsi le premier pays producteur de médicaments dans l'UE25. L'industrie pharmaceutique européenne emploie 635 000 salariés dont 117 000 en recherche et développement (R&D).

L'industrie pharmaceutique a un poids croissant dans l'économie française. En effet, la croissance de la valeur ajoutée en volume de l'industrie pharmaceutique a été de 8 % par an, alors que celle de l'économie au global n'a été que de 2,1 % [6]. Par ailleurs, il s'agit du deuxième secteur industriel pour le niveau d'investissement en recherche, avec près de 5 Md€ investis en 2008 [6] ; au niveau européen l'industrie pharmaceutique se place en première position pour son effort de R&D (avec 27 Md€ investis en 2008 [5]). Enfin, les échanges commerciaux de médicaments représentent le quatrième excédent commercial de la France, avec 6,8 Md€ en 2009 [1]. La France est ainsi le cinquième exportateur pharmaceutique mondial, mais ses parts de marché à l'exportation de médicaments ont toutefois reculé depuis la fin des années 1990.

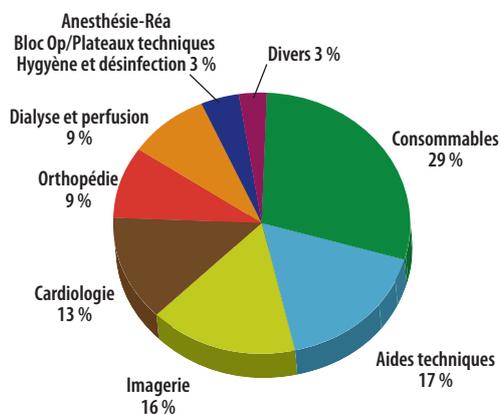
La France constitue le deuxième marché de santé animale au monde, et le premier marché européen, avec une industrie du médicament vétérinaire réalisant un chiffre d'affaires de 835 M€ en France et 1,4 Md€ à l'exportation [6].

L'industrie pharmaceutique a longtemps été un secteur important en termes de création nette d'emplois industriels ; toutefois, la conjoncture actuelle menace d'un important recul de l'emploi à l'horizon 2015 [1].

Produits de santé : dispositifs médicaux

Le marché mondial du dispositif médical hors diagnostic *in vitro* est estimé à environ 166,6 Md€ en 2008, dont 53,6 Md€ pour le marché européen [7], et connaît une progression de 5-6 % par an [2]. L'Allemagne est clairement le leader du marché européen, avec 27,8 % du marché européen. En France, le marché était de 6,2 Md€ en 2008 pour les dispositifs médicaux hors diagnostic *in vitro* [2].

Répartition du marché des dispositifs médicaux (hors diagnostic *in vitro*) en 2008 en France [2] (100% = 6,2 Md€)



En 2008, le marché mondial du diagnostic *in vitro* est de 27 Md€, dont 9,98 Md€ pour le marché européen [8, 9]. La France représente, quant à elle, 16,6 % de ce marché, se plaçant en seconde place en Europe (derrière l'Allemagne).

Il y a environ 11 000 entreprises de technologies médicales en Europe, sachant que les petites et moyennes entreprises (PME) représentent plus de 80 % de ce tissu [7]. L'industrie technologique médicale européenne emploie 435 000 salariés et l'effort de R&D représente 8 % du chiffre d'affaires en 2008 [2, 6]. En France, on dénombre plus de 5 300 entreprises et environ 40 000 salariés [6].

L'enjeu pour les entreprises françaises est d'exister dans les dispositifs médicaux à forte valeur ajoutée, pour conquérir des parts de marché, en particulier sur les marchés publics hospitaliers, qui pèsent en France plus de 15 Md€ par an [10], et à l'étranger.

Aliments santé et produits de cosmétique

Certains aliments santé ou alicaments revendiquent un effet sur la santé, reconnu ou non par les autorités de santé, sans avoir le statut de médicament. Le marché des alicaments représente un chiffre d'affaires de 80 Md€ en Europe, Amérique du Nord et Japon [6] (chiffre incluant les compléments alimentaires). En 2007, le marché mondial des aliments fonctionnels (hors compléments alimentaires) atteint 46,7 Md€ et les projections ciblent un rythme de croissance de 5,7 % de croissance par an [11] après avoir connu une croissance de 13 à 14 % par an les cinq années précédentes [12]. Plusieurs raisons viennent expliquer cette croissance : le vieillissement de la population, l'augmentation des dépenses de santé, l'intérêt croissant des consommateurs pour la nutrition et le bien-être, ainsi que les avancées scientifiques et cliniques reliant la nutrition à la prévention des maladies.

En France, le marché des alicaments a connu une croissance de 10 % en 2007 et un volume de ventes de 8 Md€ [13]. L'industrie évolue du fait de cet essor, avec un intérêt marqué des industries pharmaceutiques elles-mêmes (acquisition par Sanofi-Aventis de Symbion) et l'orientation massive des acteurs de l'agroalimentaire vers ce marché (acquisition de Numico par Danone par exemple).

Chiffres clés des industries de fabrication de parfums et de produits pour la toilette 2007, pour les entreprises de 20 salariés ou plus

	PMI	250 ou plus	Taille hors tranche	Ensemble (20 ou plus)
Nombre d'entreprises	138,0	32	25	195
Effectif employé (milliers)	10,8	28,2	5,7	44,7
Chiffre d'affaires HT (Md€)	2,5	9,5	5,0	17,0
Exportations	0,9	4,0	3,3	8,2

L'industrie de la cosmétique continue à peser un poids non négligeable dans l'industrie française, avec 17 Md€ de chiffre d'affaires en 2007, dont quasiment la moitié réalisée à l'export [1, 4].

Services

Parmi les services dits de support à la santé, on comprend essentiellement les *Contract Research Organizations* (CRO) et les *Contract Manufacturing Organizations* (CMO), les assurances privées et les entreprises d'e-santé, qui présentent les plus forts potentiels de croissance en termes de valeur économique.

Le marché des CMO devrait croître de 22,2 Md€ en 2009 à 33,7 Md€ en 2014 [18], les industries pharmaceutiques cherchant à réduire les coûts fixes associés aux équipements de production, particulièrement élevés dans le cas des biomolécules. Selon les sources, le marché mondial des CRO est de 15 à 19 Md€ en 2010 [13, 19, 20], dont 12 Md€ pour la recherche clinique, et devrait connaître une croissance de plus de 8 % par an. En France, 80 sociétés se partagent le marché des CRO cliniques d'environ 600 M€, dont 56 % réalisés par les filiales des groupes étrangers [13]. Des services sont par ailleurs développés autour de nouveaux modèles *in vivo* et *ex vivo*.

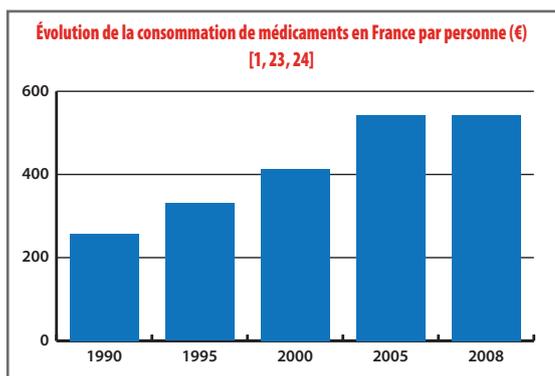
Le marché de la e-santé représente actuellement 15 à 20 Md€ en Europe et repose sur un tissu particulièrement fragmenté, avec 20 leaders industriels et pas moins de 5 000 PME opérant sur ce marché [14]. Il compte ainsi pour 2 % des dépenses de santé en Europe, alors que l'objectif qui était affiché par l'UE pour 2010 était de 5 %. En France les TIC ne représentent encore qu'1,5 % des dépenses de santé [15, 16]. Toutefois, le marché de la e-santé est amené à croître fortement parce qu'il fait l'objet d'actions dédiées de la part des autorités publiques. En effet, la e-santé est porteuse d'une forte création de valeur, en termes de développement de l'offre industrielle et de services innovants ainsi que de potentiel d'exportation. Elle permet également de diminuer les dépenses de santé, grâce au développement de l'hospitalisation à domicile en alternative aux coûts d'hospitalisation classique (56 % du budget de l'assurance maladie [17]) ou grâce à l'économie réalisée sur les transferts des patients grâce aux dispositifs de téléconsultation ou téléradiologie. Enfin, la e-santé permet véritablement l'amélioration de la qualité des soins délivrés à la population.

Les services à la personne représentent quant à eux un chiffre d'affaires en France de 15,6 Md€ en 2008 [21] contre 11 Md€ en 2005 [22].

Enjeux globaux dans le domaine de la santé

Le secteur de la santé, aussi bien d'un point de vue industriel que de service, est en mutation profonde. En effet, les tendan-

ces démographiques et épidémiologiques font émerger de nouveaux enjeux majeurs en termes de santé publique (cancer, maladies cardiovasculaires, maladies neurodégénératives, pathologies émergentes, autonomie à domicile, etc.). Les attentes sociétales sont également de plus en plus fortes : la croissance des dépenses de santé étant supérieure à celle du PIB, il est nécessaire de gérer cette augmentation tout en maintenant la qualité et l'égalité d'accès aux soins.



Les affections longues durées (ALD) pèsent de plus en plus lourd sur les dépenses de santé. Le nombre de personnes en ALD en 2015 est estimé à 12 millions d'assurés, dont 11 millions pour le seul régime général [25], soit une hausse totale entre 2006 et 2015 de 42 %. Cette progression est principalement liée à l'augmentation de la prévalence des ALD à structure d'âge identique (pour les trois quarts), et dans une moindre mesure au vieillissement de la population (pour un quart). La projection montre que 70 % des remboursements seraient concentrés sur les ALD en 2015. En outre, la croissance des dépenses liées aux personnes en ALD compte pour plus de 80 % dans la hausse tendancielle des dépenses. Dans ce cadre, les dépenses de l'assurance maladie passeraient de 140 Md€ en 2006 à un montant de 210 Md€ environ en 2015 (données tous régimes). La gestion dans le temps du dispositif, la modification des conditions d'entrée, l'extension de la prise en compte de certains facteurs de risque, font qu'un nombre important de personnes en ALD ne sont en réalité pas exposées à des maladies « longues et coûteuses » comme le voudrait la réglementation. La Haute Autorité de santé (HAS) travaille sur les différentes évolutions possibles dans les critères d'entrée en ALD.

Devant la complexité de notre environnement, améliorer la prévention, l'observance des patients et assurer une prise en charge globale des malades devient une nécessité.

Les conséquences sont donc nombreuses sur les entreprises de santé. En ce qui concerne les médicaments, on observe un ralentissement du marché du médicament (notamment en termes de nombre de lancements de nouvelles molécules) et la part grandissante des génériques. Dans ce cadre, les entreprises françaises, et plus largement européennes, doivent faire face à un renforcement de la compétition internationale, notamment asiatique. Ainsi, tandis que l'industrie pharmaceutique a ouvert 14 sites de recherche en Asie entre 2001 et 2006, 18 ont

été fermés en Europe [3]. Les biomédicaments prennent également une part croissante : en 2012, ils représenteront 15 % des médicaments disponibles contre 10 % actuellement [6]. Qu'il s'agisse de génériques ou de biomédicaments, les industriels font face à des défis, en termes de maîtrise et de capacité de production (en direct ou par façonnage).

On observe également une accélération des évolutions technologiques, avec le développement de nouveaux outils et concepts au service de la santé, tels que le séquençage du génome humain, la pharmacogénomique, l'imagerie fonctionnelle, etc. Les processus de R&D s'en trouvent donc impactés, en étant plus transversaux, à la fois en termes d'acteurs impliqués (recherche publique, jeunes pousses, industries pharmaceutiques) que d'outils à disposition. D'autres facteurs impliquent une nécessaire évolution des processus de R&D. L'émergence de la médecine personnalisée et de la télésanté y participent également, puisqu'elles impliquent une prise en charge de plus en plus multidisciplinaire et globale des pathologies, alliant produits et services autour du patient. Les entreprises sont donc confrontées à l'évolution d'un modèle de production prévisionnelle vers celui d'une distribution à la demande, ainsi qu'à la complexification des modèles économiques, comme en témoigne la migration de certaines industries pharmaceutiques vers le diagnostic, voire vers le développement de services, ou encore vers la nutrition santé.

Agriculture et Agroalimentaire

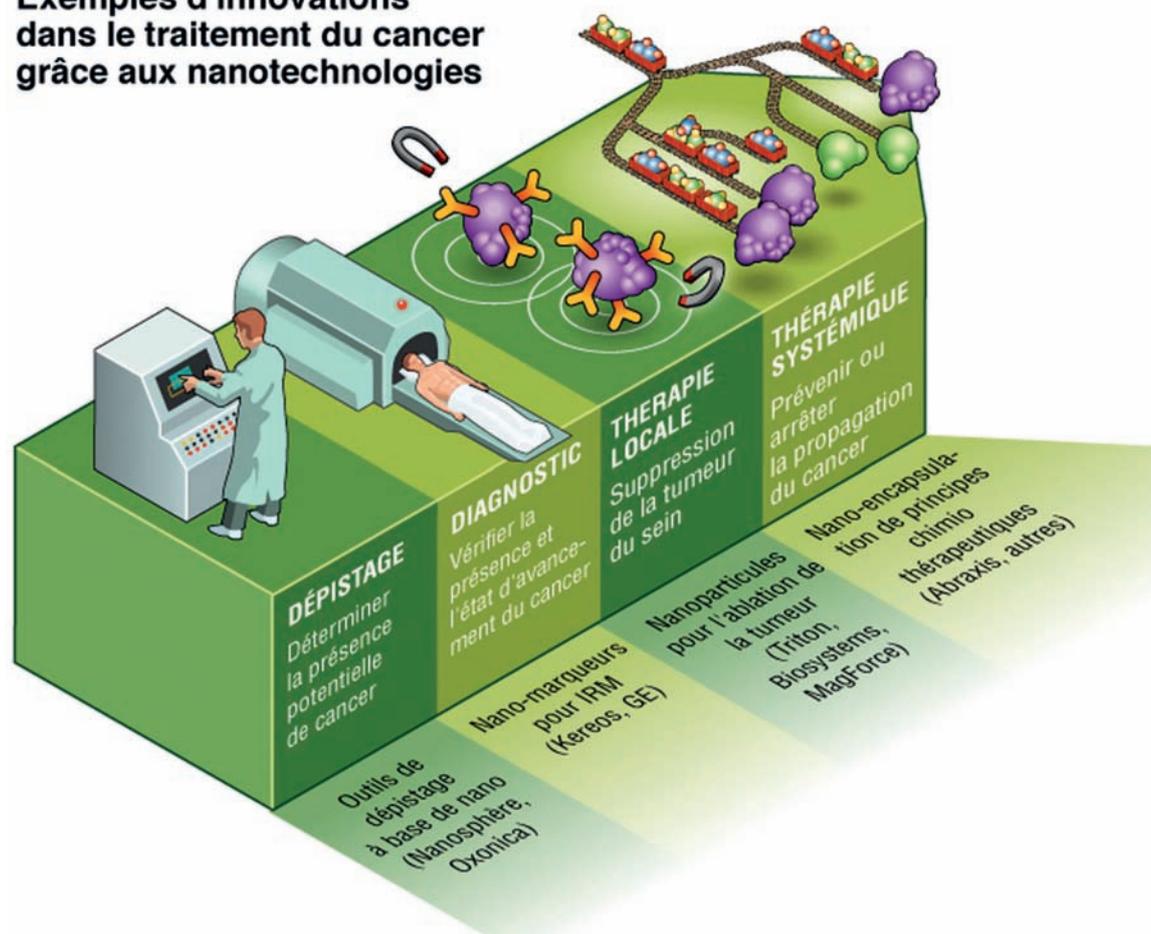
Industrie agroalimentaire

Chiffres clés de l'industrie agroalimentaire pour les entreprises de 20 salariés ou plus, 2007

	Chiffre d'affaires HT (Md€)	Salariés (milliers)	Entreprises de 20 salariés et plus
Industrie des viandes	26,9	105,2	982
Industrie du poisson	2,4	10,1	121
Industrie des fruits et légumes	6,7	23,9	195
Industrie des corps gras	2,3	2,2	42
Industrie laitière	22,2	49,3	537
Travail des grains, fabrication de produits amylacés	4,6	11,0	119
Fabrication de produits de boulangerie-pâtisserie et de pâtes	7,8	40,4	390
Autres industries alimentaires	20,9	63,6	616
Fabrication d'aliments pour animaux	8,3	16,1	219
Fabrication de boissons	18,1	34,1	462
Total Industrie Agroalimentaire	120,2	355,9	3 683,0

En France, en 2007, le chiffre d'affaires du secteur atteint 163 Md€ HT [26] dont 120,2 Md€ réalisés par des entreprises de 20 salariés ou plus (voir tableau ci-dessus). L'industrie agroalimentaire occupe ainsi une place importante dans l'économie nationale : il s'agit de la première industrie française en chiffre d'affaires ; elle emploie 412 500 salariés et présente une balance commerciale excédentaire de 6,6 Md€ [26]. En revanche, le chiffre d'affaires de l'industrie agroalimentaire est en baisse, de même que l'emploi

Exemples d'innovations dans le traitement du cancer grâce aux nanotechnologies



et le solde commercial. En effet, en 2004, les entreprises de plus de 20 salariés représentaient un chiffre d'affaires de 125,5 Md€ contre 120,2 en 2007, et employaient 386 000 salariés contre 356 000 en 2007. D'après des chiffres publiés par le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche, le chiffre d'affaires 2009 serait de 150 Md€. En 2004, le solde commercial était positif à 7,5 Md€, et d'ores et déjà en baisse de 7,4 % par rapport à 2003 [27]. Les entreprises positionnées à l'export connaissent une concurrence accrue des pays émergents. Dans l'UE27, le marché de l'alimentation animale (hors animaux domestiques) est de 145 millions de tonnes, sur lesquelles la France détient 15 % de parts de marché [28]. Pourtant, la balance commerciale de la France sur l'alimentation animale est déficitaire. L'industrie agroalimentaire demeure toutefois un pilier de l'économie française, et participe avec l'agriculture à l'aménagement du territoire et à l'image de marque de la France. L'industrie agroalimentaire reste très dispersée, avec pas de moins de 10 500 entreprises dont 97 % de PME et 70 % de TPE (très petites entreprises) [29]. Ainsi, beaucoup d'entreprises n'ont pas une taille critique suffisante pour investir et aborder le marché international. Pourtant, de nombreux défis doivent être relevés. L'amont agricole est en pleine mutation, l'aval de la filière est particulièrement concentré et les industries agro-

alimentaires sont confrontées à des marges faibles du fait des rapports de force avec les distributeurs mais aussi de la volatilité des prix des matières premières. Cette situation nuit également à l'image du milieu aux yeux des consommateurs, qui ont déjà tendance à réduire la part de leur budget dédié à l'agroalimentaire. D'autre part, les exigences réglementaires sont croissantes, sont souvent plus fortes en France que dans d'autres pays, et demandent des moyens humains et financiers pour y répondre. Les entreprises doivent également lutter contre les risques de fraude et de contrefaçon.

Le degré d'innovation est plus faible comparativement à d'autres secteurs industriels. Dans l'agroalimentaire, 7 % du chiffre d'affaires est consacré à l'innovation en moyenne [29]. Moins de 1 % du chiffre d'affaires est dédié à la recherche en tant que telle. Toutefois, le secteur est propice à d'autres formes d'innovations, qui seront capitales à l'avenir : marketing, circuits de distribution, emballages, recettes, design, qualité, développement durable, services associés, etc. Des experts soulignent par exemple l'importance des stratégies mutualisées, notamment en termes de logistique et d'exportation.

Les industriels doivent également anticiper les attentes des consommateurs, elles aussi croissantes et changeantes : alimentation au service du bien-être et de la santé, produits

d'origine biologique, traçabilité et sécurité alimentaire, transparence dans la chaîne alimentaire et logistique, prise en compte de la problématique environnementale à la fois dans les procédés et dans la logistique. Au-delà des attentes des consommateurs, comprendre leurs processus de choix est également un enjeu majeur de l'agroalimentaire, d'où le recours à des outils existants, ou à venir, de type observatoire.

Agriculture

En France, le secteur emploie, en 2009, 900 000 personnes [30], à temps plein ou partiel. Ce nombre continue de décroître, de 7 % depuis 2005 et de plus de la moitié depuis 1988, de même que le nombre d'exploitations agricoles. Les indicateurs de la santé du secteur sont tous à la baisse, et ce, depuis plusieurs années, notamment du fait de la forte baisse des prix agricoles.

Indicateurs des comptes agricoles provisoires 2009
(source : Agreste)

	2009	Évolution 2008-2009	Évolution 2007-2008
Production agricole hors subvention (Md€)	60,6	-8,5	
Production agricole au prix de base (Md€)	63,1	-8,3	
Valeur ajoutée brute	22,2	-16,8 %	-6,8 %
Résultat agricole net		-19,6 %	-11,6 %

La France contribue pourtant toujours largement à la production européenne (à hauteur de 18 % hors subventions [21]). Au-delà de cet enjeu de résistance à la volatilité des prix, l'agriculture fait toujours face à l'enjeu d'identifier et de mettre en place les bonnes pratiques en termes d'occupation et de valorisation des territoires, de respect des ressources naturelles et de l'environnement. L'agriculture et la forêt doivent à la fois produire plus pour répondre aux besoins de la population et aux besoins croissants liés à la valorisation non alimentaire des cultures, et produire mieux pour préserver les ressources naturelles et la biodiversité. Le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche a ainsi défini un plan pour un nouveau modèle agricole : Objectif Terres 2020. Ce plan définit les axes de travail prioritaires : réduire l'usage et l'impact des produits phytosanitaires (notamment via le plan Écophyto, qui vise à réduire de 50 % l'usage des produits phytosanitaires en agriculture à horizon 2018), engager les entreprises agricoles dans le développement durable (notamment en améliorant la performance énergétique des exploitations), développer les potentialités de l'agriculture biologique, remettre l'agronomie au centre de l'agriculture et repenser des pratiques adaptées aux territoires. Les efforts doivent donc être poursuivis pour le développement d'une ingénierie de l'agriculture durable, par la mise en place de techniques alternatives de culture, de nouvelles variétés, etc., mais aussi porter sur la structuration des filières, par exemple dans le cas de l'agriculture biologique, sur la formation, sur la certification environnementale, etc. Enfin, le soutien public de l'agriculture reste coûteux ; des débats sur le futur de la politique agricole commune (post 2013) sont notamment en cours.

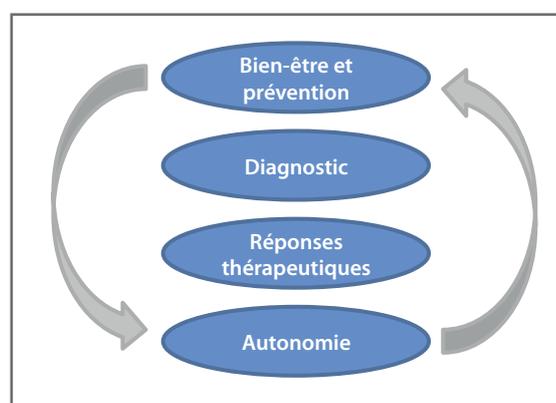
Services

De nombreux services existent également pour l'agriculture et l'agroalimentaire : services de R&D, bureaux d'études, services de conditionnement, sociétés de distribution (nouveaux types de canaux comme ceux des paniers biologiques), services de conseil notamment en innovation.

Les grandes tendances d'évolution du secteur

Santé

Les enjeux dans le domaine de la santé sont repris et illustrés ci-dessous :



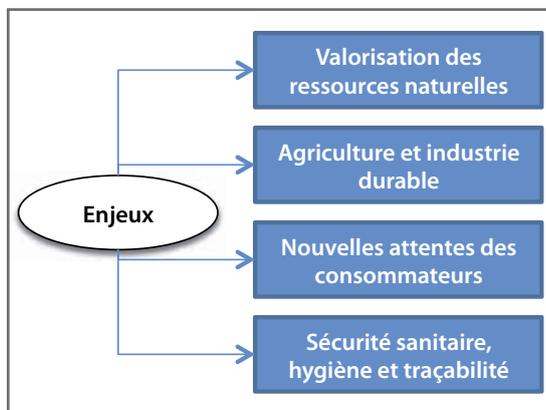
Pour répondre aux enjeux de bien-être, de prévention et d'autonomie, de nombreux produits et services vont rencontrer une demande croissante (au-delà des loisirs et de la culture). Les produits cosmétiques sont ainsi toujours recherchés par les consommateurs, et les industries développent des formulations plus innovantes, de nouveaux ingrédients apportant des fonctionnalités nouvelles, tout en étant abordables pour les consommateurs. Les produits alliant nutrition et santé (compléments alimentaires, aliments fonctionnels) ont vu leur marché se développer fortement et cette tendance devrait se poursuivre. À l'image de la cosmétique, mais aussi de la pharmacie, l'innovation passe également par l'identification et la caractérisation de nouveaux ingrédients, dont des ingrédients d'origine naturelle (ressources végétales, animales, marines), leur formulation, puis par le design des produits, leur stratégie marketing et leurs circuits de distribution. De nombreuses sociétés de service gravitent autour de ces activités, proposant leurs compétences en extraction, synthèse et caractérisation de composés, en formulation, en production à façon, en stratégie et en marketing. L'autonomie des personnes est un enjeu majeur de notre société, aussi bien pour les personnes âgées, souffrantes ou non, que pour les patients atteints de maladies chroniques ou en retour d'hospitalisation. Elle répond autant à un besoin de bien-être des personnes qu'à la nécessité de réduire les coûts de santé. Ainsi, les années à venir verront se multiplier les thérapies utili-

sables à domicile (de par leurs voies d'administration) ; des dispositifs médicaux, implantables ou non, permettant d'ajuster la délivrance de médicaments, suivre l'activité des personnes ou des paramètres biologiques et physiologiques ; des systèmes de communication entre les personnes à domicile et le personnel médical. On retrouve ainsi un large pan de la télésanté, avec notamment la télémedecine, tant en termes de produits que de services associés. De nombreuses initiatives sont en cours pour pallier les verrous actuels de la télémedecine, laissant présager d'un réel développement de l'offre dans les prochaines années. Plus largement, l'ensemble des services à la personne continuera à se développer et constituera une importante source de création d'emplois. Des dispositifs médicaux continueront à pallier les déficiences sensorielles, motrices et les handicaps de manière générale, de même que des aides techniques et des biens de consommation au design et à l'ergonomie adaptés aux populations concernées.

Le secteur du diagnostic connaît lui aussi des évolutions majeures. Les besoins sont nombreux : améliorer le diagnostic des pathologies, établir un diagnostic plus rapidement, en termes de précocité dans le processus de développement de la pathologie et de rapidité d'analyse. Les efforts des industriels portent ainsi sur l'identification de biomarqueurs spécifiques sur lesquels reposeront de futurs tests de diagnostic. De nouveaux équipements et dispositifs d'analyse seront également nécessaires, soit pour être adaptés aux biomarqueurs qui seront retenus, soit pour permettre la réalisation de multiplexages ou de diagnostics rapides dits « point-of-care ». Les avancées en imagerie, tant en termes techniques que d'interprétation, viendront également compléter l'évolution du domaine du diagnostic. Quel que soit l'outil de diagnostic, des sociétés pourront également se développer grâce à l'élaboration d'outils logiciels d'aide à la décision.

Enfin, le développement de nouvelles approches thérapeutiques se poursuit, et les années à venir verront s'établir ou se développer de nouvelles thérapies innovantes et efficaces : des thérapies ciblées (pour les cancers par exemple), des thérapies cellulaires voire géniques, des organes artificiels et des prothèses présentant une plus grande longévité et résistance, des procédures et équipements de chirurgie mini-invasive, etc. Tous ces développements permettront, d'une part, de proposer des solutions qui font défaut aujourd'hui, d'autre part, de permettre le choix parmi une palette d'outils plus adaptés à la situation de chacun, grâce aux outils de diagnostic et de thérapeutique. De nombreuses activités de service accompagnent le développement de ces outils thérapeutiques et jouent un rôle croissant dans la stratégie des industries pharmaceutiques elles-mêmes. On peut ainsi citer des services d'identification, de synthèse et de caractérisation de composés, d'essais d'efficacité et de toxicité de molécules thérapeutiques, de formulation et de production à façon, et des services en stratégie, marketing et organisation, etc. Avec le séquençage du génome, des acteurs français pourraient prendre une place de choix sur le marché de service de séquençage.

Agriculture et Agroalimentaire



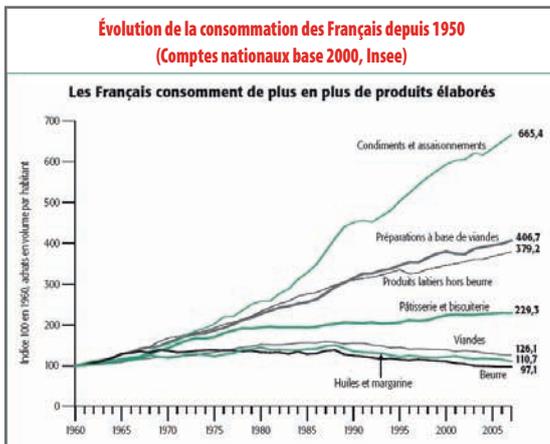
Le ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche a publié une réflexion stratégique sur les dix priorités agro-industrielles de recherche et développement. De nombreux enjeux tournent autour de l'agriculture et de l'alimentaire durable.

Un premier enjeu de l'agriculture et de l'agro-industrie est d'optimiser l'usage des ressources naturelles en les valorisant, cette valorisation pouvant être à usage alimentaire ou non. S'il est entendu que certaines ressources font déjà l'objet de conflits entre usage alimentaire ou non, d'autres ressources peuvent être mieux ou davantage valorisées. La chimie du végétal permet, par exemple, d'avoir accès à de nouvelles molécules fonctionnelles. Les produits qui en sont issus servent de nombreux domaines (plasturgie, habillement, biomédical, etc.). La croissance mondiale des produits de la chimie du végétal est actuellement de 50 % par an. La chimie du végétal est davantage développée dans la section Chimie-Matériaux-Procédés. La valorisation des produits de la mer constitue également une priorité, dans le but d'optimiser les prélèvements des réserves halieutiques et d'accroître la rentabilité des acteurs de la filière. En effet, actuellement, 50 % des poissons et coquillages prélevés ne sont pas valorisés [26] et pourraient être transformés en préparations intégrées dans des produits de consommation, en produits « nouveaux » (plats préparés), recyclés dans l'élaboration d'aliments pour animaux ou valorisés pour des usages non alimentaires (déchets, peaux, etc.).

L'agriculture et l'agroalimentaire doivent également répondre à leurs propres enjeux de durabilité et de respect de l'environnement. De nombreux produits peuvent œuvrer en ce sens et font l'objet de développements. De nouvelles variétés végétales seront sélectionnées pour adapter l'agriculture au changement climatique, aux attentes de forts rendements et de faible consommation en intrants, tout en assurant une haute valeur nutritionnelle et organoleptique (il faut noter que la sélection de nouvelles variétés s'applique également aux plantes d'ornement et d'espace vert). Des produits et outils de sélection des reproducteurs existent également et se développeront encore dans diverses filières animales, soit pour préserver des races, augmenter le rendement des productions animales ou faciliter les conditions d'élevage.

Le développement d'engrais naturels et de produits de phytopharmacie se poursuivra. Des engrais naturels enrichis en micro-organismes sont ainsi prometteurs, de même que des molécules stimulant les défenses naturelles des plantes. Il est également critique de mettre au point de nouveaux aliments pour les animaux d'élevage, pour assurer la substitution des protéines animales.

Au-delà des produits qui caractériseront l'évolution du secteur de l'agroalimentaire, il faut également noter que de nouveaux procédés viendront transformer l'industrie, toujours dans une optique de durabilité : des procédés de maîtrise de l'énergie et de réduction des émissions de CO₂, d'optimisation de la consommation en eau, de prévention et de traitement des rejets et déchets. Les habitudes et choix de consommation alimentaire sont extraordinairement variables, comme le montre le graphique ci-dessous, et doivent être anticipés.



Certains produits se sont démarqués dernièrement et occupent une place de choix sur le marché, offrant ainsi des possibilités de diversification des débouchés pour les entreprises. Les *smoothies*, mélanges de fruits et de légumes mixés, soupes fraîches « micro-ondables », constituent un exemple de marché émergent. Les consommateurs recherchent également des vins plus légers, des produits de charcuterie de la mer et des produits crus (de type sushis). Les aliments fonctionnels et les compléments alimentaires resteront des produits phares, avec de nouvelles fonctionnalités recherchées, bien que la réglementation sur les allégations se durcisse. Les consommateurs sont également en demande de produits prêts à consommer. Cette demande impacte le produit lui-même, le procédé de production et le conditionnement.

Enfin, un enjeu de taille est celui de la sécurité sanitaire, de l'hygiène et de la traçabilité. Ceci impacte, entre autres, le secteur de l'emballage, avec par exemple de futurs emballages actifs capables d'interagir de façon intelligente avec un contenu agroalimentaire ou encore de contenir toutes les informations sur le produit, des films plastiques comestibles, etc. Le respect de cet enjeu passera également par de nouveaux procédés de production et d'assemblage.

Santé, Agriculture et Agroalimentaire

Deux enjeux communs à la santé, à l'agriculture et à l'agroalimentaire doivent être soulignés : la bioproduction et le développement de biomarqueurs.

Tout d'abord, la bioproduction constitue un réel enjeu pour les industriels. L'étude « Bioproduction en 2008 : état des lieux et recommandations pour l'attractivité française » conduite conjointement par le LEEM et le Génopôle, souligne que la part des biomédicaments dans l'industrie pharmaceutique passera de 10 % à plus de 15 % entre 2007 et 2012. Actuellement, les capacités mondiales de bioproduction sont estimées entre 3 et 3,5 ML, dont 30 % en Europe. La France est très en retard, avec à titre d'exemple seulement 1 % de la capacité de bioproduction en cellules mammifères en Europe (contre 55 % en Allemagne) [20, 31, 32]. Au-delà des biothérapies, la bioproduction constitue également un enjeu clé pour les industries agroalimentaires, pour la production de nouveaux ingrédients par exemple. Le développement de la bioproduction dépend de nombreuses technologies. Le choix a été fait de ne pas retenir les technologies pour la bioproduction comme clés en tant que telles. Toutefois, certaines technologies retenues ont pour application la bioproduction et tiennent ainsi en compte cet enjeu particulièrement crucial.

Les biomarqueurs ouvrent de nouvelles perspectives en biologie. Ils peuvent être utilisés pour mieux comprendre les mécanismes associés à une pathologie, découvrir de nouveaux médicaments, tester l'efficacité et la toxicité de nouveaux traitements, stratifier les patients, mettre au point de nouvelles stratégies de diagnostic, etc. Dans l'agroalimentaire, les biomarqueurs permettent non seulement de soutenir et démontrer des allégations nutritionnelles et de santé mais ils peuvent également être utilisés pour la sélection végétale. Plus largement, ils accompagnent une meilleure compréhension des phénomènes biologiques et de toutes les applications qui en découlent. L'identification et le développement de biomarqueurs font appel à un faisceau multiple de technologies et disciplines : génomique, protéomique, métabolomique, technologies d'analyse etc. Dans cette étude, les biomarqueurs ont été considérés comme des applications de technologies retenues comme clés, compte tenu de la diversité des outils au service des biomarqueurs.

Les tendances technologiques et les technologies clés

De très nombreuses technologies et outils sont nécessaires pour le développement des produits et services servant les enjeux à venir. On distingue tout d'abord des technologies servant des thèmes centraux à toutes les disciplines du vivant et pour lesquelles des avancées scientifiques et techniques considérables ont permis d'apporter de nouveaux outils et concepts : la génomique, la transcriptomique, les microRNA, la protéomique et

la métabolomique. Leur utilisation sera un prérequis pour de nombreuses recherches : meilleure compréhension des mécanismes moléculaires et cellulaires, des liens entre une molécule ou un aliment et des fonctions biologiques, identification de nouvelles cibles moléculaires et de biomarqueurs, etc. La plupart de ces technologies n'ont pas été retenues comme clés pour plusieurs raisons : d'une part, il s'agit pour la plupart d'approches méthodologiques arrivant à maturité, d'autre part, l'enjeu réside surtout dans la traduction des connaissances sur le génome et des données « -omiques » en résultats cliniques. Par ailleurs, les technologies utilisées sont aujourd'hui essentiellement américaines (Affimetrix, Agilent, Illumina). Les acteurs français ont en revanche une carte à jouer en termes d'utilisation de ces outils (structuration de plateformes, savoir-faire) et de services de génotypage.

Ce sont davantage les données générées par les approches haut débit et « -omiques » qui sont sous-exploitées. Ceci s'explique en grande partie par le manque de moyens dans les domaines de l'informatique et de la bio-informatique, celle-ci étant définie comme l'ensemble des approches algorithmiques, statistiques et mathématiques permettant d'une part de traiter les données et d'autre part de modéliser la dynamique des réseaux biologiques complexes et des structures moléculaires. Par ailleurs, les approches in silico pour assurer le criblage virtuel et prédire l'ADME (Absorption, Distribution, Métabolisme et Elimination) et la toxicité des molécules sont également un relié. Les technologies pour le calcul intensif ont ainsi été retenues comme clés et traitées dans la section TIC. La simulation moléculaire a également été retenue comme clé et est traitée dans la section Chimie-Matériaux-Procédés.

Parmi les technologies dites transversales figurent également les nanotechnologies appliquées à la biologie. Elles permettent d'apporter une dimension nouvelle pour l'étude de molécules biologiques et de leurs modes d'actions, de nouveaux vecteurs et formes galéniques. Les nanopuces, nanoréacteurs et autres outils miniaturisés permettent de caractériser des propriétés et interactions de molécules sans avoir à les produire à grande échelle, d'étudier des molécules uniques, de développer des systèmes automatisables voire autonomes. Les nanotechnologies constituent ainsi une technologie clé, qui est traitée dans les sections Chimie-Matériaux-Procédés et TIC de ce document.

L'ensemble des enjeux des secteurs de la santé, de l'agriculture et de l'agroalimentaire, peuvent être synthétisés en quatre grands enjeux :

- le bien-être des personnes, la prévention et la sécurité sanitaire ;
- la bioproduction ;
- la meilleure prise en charge des patients ;
- l'agriculture et l'alimentaire durable.

Le schéma ci-contre explicite les technologies clés retenues en fonction de leurs réponses aux enjeux ci-dessus.

Ingénierie cellulaire et tissulaire	<ul style="list-style-type: none"> • Bioproduction • Meilleure prise en charge des patients
Ingénierie génomique	<ul style="list-style-type: none"> • Bioproduction • Meilleure prise en charge des patients • Agriculture et alimentaire durables
Ingénierie du système immunitaire	<ul style="list-style-type: none"> • Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire • Meilleure prise en charge des patients
Technologies pour la biologie de synthèse	<ul style="list-style-type: none"> • Bioproduction • Meilleure prise en charge des patients • Agriculture et alimentaire durables
Systèmes bio-embarqués	<ul style="list-style-type: none"> • Meilleure prise en charge des patients • Agriculture et alimentaire durables
Technologies pour la maîtrise des écosystèmes microbiens	<ul style="list-style-type: none"> • Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire • Agriculture et agroalimentaire durables
Capteurs pour le suivi en temps réel	<ul style="list-style-type: none"> • Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire • Meilleure prise en charge des patients • Agriculture et agroalimentaire durables
Technologies de diagnostic rapide	<ul style="list-style-type: none"> • Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire • Meilleure prise en charge des patients • Agriculture et agroalimentaire durables
Technologies pour l'imagerie du vivant	<ul style="list-style-type: none"> • Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire • Meilleure prise en charge des patients
Technologies douces d'assainissement	<ul style="list-style-type: none"> • Bien-être des personnes, prévention et sécurité sanitaire • Agriculture et agroalimentaire durables

Par ailleurs, d'autres technologies s'ajoutent aux technologies ci-dessus pour développer ou proposer des produits ou services complets.

Au-delà des technologies de calcul intensif, de simulation moléculaire et des nanotechnologies, d'autres technologies relevant des TIC (et figurant dans la section correspondante) sont clés et desservent les secteurs de la santé, de l'agriculture et de l'agroalimentaire :

- logiciel embarqué et processeurs associés ;
- nanoélectronique ;
- optoélectronique ;
- interfaces homme-machine ;
- technologies 3D ;
- sécurité holistique (notamment des données et de leur transfert) ;
- objets communicants ;
- technologies réseaux sans fil ;
- portail, collaborations et communications unifiées ;
- robotique.

À titre d'exemple, de nouvelles technologies chirurgicales et interventionnelles sont attendues. La robotique a ainsi été retenue comme une technologie clé, notamment pour ses applications médicales : nouveaux outils interventionnels miniaturisés pour des gestes et actes chirurgicaux, systèmes de comanipulation et de télémanipulation à distance.

Technologies relevant des sciences économiques, humaines et sociales

En dehors des technologies dites « dures », le domaine des technologies « molles », relevant des SES et SHS (sciences économiques, humaines et sociales) et d'autres formes d'innovation, doit également être souligné puisque participant à part entière aux enjeux à venir.

Tout d'abord, il existe des besoins forts sur des thèmes très globaux tels que la santé publique, la production alimentaire durable et la gestion de la chaîne alimentaire. Ces thèmes de

recherche nécessitent une forte interdisciplinarité : épidémiologie, médecine, démographie, sociologie, psychologie, économie, géographie, anthropologie, neurosciences, etc.

La recherche en santé publique est indispensable à l'élaboration des recommandations pour la pratique médicale, au fonctionnement du système de santé et à l'établissement des politiques publiques dans ce domaine. Plusieurs champs de recherche sont clés et ont ainsi été retenus par l'Institut Santé publique :

- le champ santé-environnement-travail-modes de vie, afin de répondre aux nouveaux défis sanitaires résultant des transformations de l'environnement (physiques, chimiques, biologiques et sociales) et de celles des modes d'organisation socio-économiques ;
- le champ de la recherche sur les handicaps et l'autonomie, dans toutes leurs dimensions (épidémiologie, démographie, conditions de vie, politiques du handicap et leur mise en œuvre, place des usagers, etc.) pour faire face au vieillissement démographique et à l'augmentation de la prévalence des maladies chroniques ;
- le champ de recherche sur les politiques de santé et les enjeux sociaux de la médecine, afin de répondre aux multiples défis issus de la transformation des savoirs et des pratiques dans ces domaines ;
- le champ de la santé reproductive, de la santé des enfants et des adolescents (problématiques de développement, comportementales, environnementales et familiales) ;
- le champ de l'urgence sanitaire : réponses à l'émergence de maladies nouvelles, aux alertes et aux situations de crise, à la mondialisation et au changement climatique ;
- le champ de la prévention (addictions, éducation nutritionnelle), de l'analyse des services de santé et des pratiques de santé (transformations affectant les services de santé, évolutions des pratiques, nouveaux acteurs, intégration des innovations). Des recherches sont également nécessaires sur la production alimentaire durable et la gestion de la chaîne alimentaire, avec des axes de recherche à conduire, tels que :
- le développement de méthodologies décrivant les paramètres essentiels de durabilité du système d'approvisionnement alimentaire ;
- le développement d'outils de modélisation dynamique pour déterminer et démontrer les frontières en termes de durabilité entre les différents modes de production ;
- l'élaboration de modèles décrivant les chaînes des matières premières biologiques et alimentaires en Europe, pour montrer la durabilité des différentes chaînes d'approvisionnement dans le contexte européen global ;
- l'identification des facteurs qui à l'avenir affecteront ou amélioreront la durabilité des différents systèmes de production et des chaînes de valeur et, de là, l'élaboration de scénarios intégrant les changements démographiques, économiques, politiques, environnementaux, etc. ;
- l'identification et l'analyse des pressions environnementales, sociales et économiques s'exerçant sur la production alimentaire primaire et donc impactant la durabilité de la chaîne alimentaire et, de là, l'identification d'options pour gérer ces pressions et améliorer la durabilité ;



- l'analyse et l'optimisation des systèmes de production durables en prenant en compte les dimensions paysagères et de qualité de vie ;
 - l'analyse et le suivi des tendances des modes de vie, telles que l'utilisation d'énergie, d'eau et le recyclage des déchets, ainsi que les modes de consommation alimentaires et d'achat (en particulier l'importance accordée à la durabilité des produits consommés) ;
 - l'étude des opportunités d'innovations et d'améliorations dans les processus organisationnels tout au long de la chaîne de valeur ;
 - l'analyse et l'élaboration de modèles organisationnels alternatifs, combinant efficacité et réactivité, aux demandes changeantes des consommateurs ;
 - la compréhension et la cartographie des besoins de traçabilité et de transparence des entreprises, de la chaîne de valeur dans son ensemble et des consommateurs ;
 - la compréhension fine des besoins d'intégration et des barrières à l'intégration des PME dans la chaîne de valeur ;
 - la modélisation d'approches pour une coopération fonctionnelle au sein des réseaux de PME.
- De plus, les sciences de la vie et leur manipulation soulèvent de nombreuses questions d'éthique et d'acceptabilité par la population, comme il sera détaillé pour chacune des technologies clés.

Il est ainsi crucial que des spécialistes des sciences humaines et sociales développent des recherches spécifiques sur ces questions pour proposer aux acteurs du domaine et aux politiques publiques des clés pour répondre à ces questions et ainsi permettre le développement et la diffusion des technologies.

Analyse de la position de la France

Compétences et positionnement

La France a un historique fort dans le domaine des sciences de la vie. On compte ainsi 30 000 chercheurs et enseignants-chercheurs de la recherche publique en sciences de la vie, soit 30 % des effectifs totaux de la recherche publique.

Globalement, la France dispose d'atouts scientifiques, industriels et médicaux. Le savoir-faire d'excellence de la recherche publique en sciences du vivant est un facteur clé de compétitivité pour les entreprises françaises et d'attractivité du territoire, d'autant plus que ces compétences et savoir-faire peuvent servir les besoins de la demande au niveau mondial. Il faut toutefois souligner une érosion de la position de la France. Par ailleurs, la France a une réelle culture des mathématiques appliquées et a donc de solides compétences en termes d'ingénierie, de bases de données et de télécommunications sécurisées, nécessaires notamment pour les dispositifs médicaux, la modélisation et la e-santé. Néanmoins, il serait nécessaire de rapprocher les formations cliniques, biologiques et en sciences de l'ingénieur au niveau académique, mais aussi et surtout au niveau des entreprises.

Production scientifique

L'analyse des indicateurs établis par l'Observatoire des sciences et techniques (OST) montre que la production scientifique en sciences du vivant est relativement faible quantitativement, mais avec une qualité croissante (croissance de 6 % de l'indice d'impact entre 2001 et 2006 [33]) bien qu'avec un indice d'impact plus faible que celui des principaux pays européens concurrents. Si la part mondiale des publications scientifiques (au global) connaît une érosion depuis 1993, en France, la recherche biomédicale a été particulièrement affectée, passant de 5,6 % en

1999 à 4,4 % en 2005 (soit une baisse plus forte qu'aux États-Unis, en Allemagne et au Royaume-Uni). Entre 2001 et 2006, la part mondiale des publications scientifiques de la France en sciences de la vie a baissé de 17 % (baisse de 15 % en biologie fondamentale, de 17 % en recherche médicale, de 20 % en biologie appliquée-écologie [26]). Cette baisse reflète le développement rapide de la recherche dans de nombreux pays en émergence scientifique.

D'après les analyses menées par le groupe de travail de la stratégie nationale de recherche et d'innovation (SNRI), la situation est très contrastée entre les sous-disciplines des sciences du vivant. Par rapport à l'Europe, la France a un nombre de publications relativement plus élevé en microbiologie – immunologie, biochimie et génétique. En revanche, le nombre de publications françaises est relativement plus faible en bio-ingénierie, neurosciences – sciences comportementales, reproduction – biologie du développement, agro-alimentaire. L'indice d'impact relatif est faible en santé publique, mais bon en écologie et fort en agroalimentaire et agriculture – biologie végétale. L'indice d'impact et l'indice de spécialisation sont faibles pour la bio-ingénierie alors qu'il s'agit d'une composante importante pour relever le défi de la biologie synthétique.

Dans le domaine des technologies pour la santé, la part mondiale des publications françaises oscille entre 5,2 % et 6 %, comme le montre le tableau ci-dessous (selon la méthodologie de l'institut Technologies pour la santé).

Part mondiale des publications françaises en technologies pour la santé

	2006-2007
Imagerie	6,04 %
Biotechnologies	5,29 %
Médicament	5,23 %
Chirurgie	5,80 %

Analyse des brevets

En 2006, la recherche publique française a déposé 21,6 % [34] des brevets européens dans le domaine pharmacie-biotechnologie, proportion la plus élevée de tous les secteurs.

L'analyse de la part mondiale des brevets européens montre une forte spécialisation dans le domaine pharmacie-cosmétique et une « déspecialisation » en biotechnologie, celle-ci n'étant plus réelle en analysant les brevets pris aux États-Unis.

Indicateurs de l'OST relatifs à la production scientifique pour l'ensemble des sciences du vivant

	Part Monde (%)		Part dans UE (%)		Indice de spécialisation / Monde		Indice d'impact relatif*	
	2007	Évolution**	2007	Évolution**	2007	Évolution**	2007	Évolution**
France	4,1	81	11,7	87	0,95	98	0,98	109
Allemagne	6,1	88	17,7	95	1,04	105	1,07	109
Royaume-Uni	7,2	84	20,8	90	1,19	103	1,12	108

* Part mondiale des citations reçues par les publications françaises en deux ans / part mondiale des publications françaises

** Mesure de l'évolution de la valeur de l'indicateur entre 2001 et 2007 en base 100 pour 2001

Dispositifs d'accompagnement

Les politiques publiques participent au financement de la recherche, avec notamment 3Md€ de la mission interministérielle pour la recherche et l'enseignement supérieur pour les sciences du vivant et 870 M€ apportés à la recherche clinique par le ministère de la Santé [26]. Par ailleurs, le programme investissements d'avenir permettra de lever certains freins. Avant la mise en place de ce programme, la comparaison des investissements publics consacrés aux sciences de la vie et de la santé soulignait un fort déficit en France. Ainsi, le seul budget des National Institutes of Health (NIH) américains représentait un investissement public de plus de 60 € par an par habitant, contre environ 25 € en France pour l'ensemble des organismes de recherche membres d'Aviesan [26].

Si la France dispose d'un dispositif de soutien à l'innovation performant, avec le crédit impôt recherche (CIR), le statut de jeune entreprise innovante (JEI) et Oséo notamment, la difficulté majeure des entreprises (des jeunes pousses aux ETI) dans le domaine des sciences de la vie est celle du financement. Ce problème est exacerbé dans la filière santé puisque les temps de développement sont très longs et le niveau de risque est particulièrement élevé. Cette difficulté reste vraie, malgré la mise en place d'InnoBio, fonds d'investissements pour les industries des biotechnologies, dans lequel le fonds stratégique d'investissement (FSI) a injecté 140 M€.

Au niveau européen, le 7^e programme-cadre de recherche et développement (PCRD) consacre un budget annuel de plus de 1 Md€ aux sciences du vivant.

Au-delà des dispositifs de soutien financier, de nombreux dispositifs accompagnent la recherche et notamment la recherche collaborative : les pôles de compétitivité positionnés sur les axes technologiques d'intérêt pour la santé, l'agriculture, l'agroalimentaire, les instituts fédératifs de recherche, les génopôles, les cancéropôles, les syndicats et associations professionnels (LEEM, Snitem, etc.). L'alliance nationale pour les sciences de la vie et de la santé constitue également désormais un dispositif de référence.

Les politiques de santé, agricoles et industrielles influencent fortement le marché et les industries. Dans le cas des politiques agricoles et industrielles, les subventions et mesures incitatives constituent d'autres formes de dispositifs d'accompagnement. Il existe également en France un dispositif national de soutien à l'export pour les industries agroalimentaires. En revanche, les dispositifs type CIR ne sont pas ou peu applicables ni à l'industrie agroalimentaire ni aux formes d'innovations qui y sont mises en œuvre.



Recommandations

Les sciences de la vie constituent un des trois axes stratégiques de la SNRI. Il est ainsi critique de mettre en œuvre des actions permettant à la France de conquérir une position de leader sur ces secteurs.

Les sciences de la vie ont de fortes spécificités, dont des temps de développement particulièrement longs, des investissements en conséquence et des risques élevés. Les dispositifs actuels ne couvrent que des périodes de cinq ans au maximum. Les phases cliniques ne sont pas éligibles aux financements de la Commission européenne à partir de la phase IIb. L'enjeu est donc d'établir un véritable continuum des aides à l'innovation pour les sciences de la vie, et de couvrir en particulier les dernières étapes, qui sont d'une part, les plus coûteuses et d'autre part, les plus risquées, suscitant des réticences de la part d'investisseurs privés. Il pourrait ainsi être envisagé d'adapter le dispositif InnoBio en prenant en compte des échelles de temps plus longues. Il peut être également utile que l'État ait des actions plus fortes sur les fonds propres des gazelles en sciences de la vie. L'accessibilité à certains dispositifs pourrait être conditionnée à la future mise en bourse des entreprises. L'entrée au capital par l'État (par exemple via le FSI) serait également bénéfique, et aurait un effet de levier sur l'entrée au capital d'investisseurs privés. Par ailleurs, les critères d'éligibilité aux dispositifs de soutien à l'innovation ne permettent pas toujours l'accès des entreprises agroalimentaires à de tels soutiens. Il serait ainsi nécessaire de travailler à nouveau sur les critères d'éligibilité, par exemple au CIR, pour que ces entreprises, et notamment les PME, puissent en bénéficier. Le tissu agricole et agroalimentaire étant très vaste, il est difficile de couvrir l'ensemble du tissu. Des réflexions pourraient être menées sur l'amélioration du transfert des informations vers les entreprises. Les outils de type plateforme (d'in-



novation, de démonstration) sont bien adaptés aux enjeux de l'agriculture et de l'agroalimentaire et peuvent donc être davantage mis au service de ces secteurs.

La création des pôles de compétitivité a permis de mettre au cœur de la recherche la collaboration entre acteurs de diverses natures. De tels encouragements doivent être poursuivis, et pourraient également être élargis à d'autres formes de mutualisation : accès mutualisé à des outils de production, des équipements spécifiques, sans nécessairement être corrélés à des projets collaboratifs. Ceci est particulièrement vrai pour le développement de centres de bioproduction par exemple. Le soutien des politiques publiques est parfaitement adapté pour le développement de tels outils et infrastructures mutualisés. Pour développer l'attractivité de notre territoire (vis-à-vis de l'extérieur mais aussi des composantes nationales), la France doit viser le plus haut niveau technologique : vecteurs de seconde génération, dispositifs médicaux de type implantables, etc. sans viser à rattraper son retard sur les premières générations. Par ailleurs, l'accélération des développements technologiques n'a pas toujours été suivie par la mise en place de formations appropriées. Il serait ainsi nécessaire de développer des formations pluridisciplinaires, en bioproduction par exemple, ou encore sur le champ TIC et santé, pour former les futurs ingénieurs et techniciens aux compétences transverses et franchir le cloisonnement actuel entre les disciplines.

D'autres facteurs participent également à l'attractivité. Les sciences de la vie sont particulièrement concernées par les questions d'éthique et d'acceptabilité par la société. La société française est elle-même particulièrement sensible aux développements à venir et à la manipulation du vivant. Il est donc crucial que les politiques publiques engagent et poursuivent les réflexions sur ces questions, en mettant autour de la table aussi bien des membres de la société que des industriels ou des

chercheurs en sciences de la vie humaines et sociales. Pour être dans le peloton de tête de l'innovation dans ces domaines, la France doit faire en sorte que son marché accueille favorablement les avancées technologiques et leurs acteurs et incite les chercheurs et développeurs à poursuivre leur activité sur son territoire, tout en attirant les meilleures compétences mondiales. En cohérence avec l'éthique et l'acceptabilité, la France doit avoir un rôle de leader sur les questions normatives, juridiques et législatives relatives aux nouvelles technologies en sciences de la vie, et en particulier sur le plus haut niveau technologique pour lequel la France a une carte à jouer. En effet, être le premier à mettre en place des normes et standards élevés permet de conserver une longueur d'avance sur les concurrents, mais aussi de diffuser ce niveau d'exigence dans les autres pays (et ainsi éviter d'avoir des niveaux d'exigence tellement différents que les acteurs français en deviennent pénalisés).

Les politiques publiques doivent également œuvrer au développement de la recherche translationnelle, pour encourager les réflexions métiers et le développement de produits en réponse à de futurs usages. Si les instituts hospitalo-universitaires (IHU) auront de tels objectifs, d'autres types de structures doivent également être encouragées en ce sens, telles que des centres d'investigation translationnelle. À titre d'exemple, plus de 90 % des biomarqueurs sont utilisés en R&D sans jamais être retrouvés en biologie médicale. Les acteurs ne s'engagent pas suffisamment dans une démarche inscrite dans la valeur d'usage. L'enjeu est de réfléchir et de mettre en place de véritables pratiques de *data mining*, *data management*, des processus de validation et d'accès aux marchés.

Plus largement, il faut poursuivre le soutien d'outils de démonstration et de validation. Les plateformes d'innovation, les appels à projets dans le cadre du programme investissements d'avenir, sont autant d'outils propices à cela. Il conviendrait par ailleurs d'encourager la mise en place de registres de données exhaustifs pour permettre le développement des produits et services répondant aux enjeux mentionnés précédemment. Il faudrait également réfléchir aux modalités d'accès des structures (telles que les hôpitaux) aux prototypes innovants et, dans le cas des hôpitaux, définir des nomenclatures adaptées.

Au global, les politiques publiques ont un rôle clé à jouer dans la structuration des forces de recherche et d'innovation françaises. En effet, celles-ci se caractérisent souvent par un manque de coordination, ou par un manque d'interdisciplinarité. Pour autant, le futur des débouchés des sciences de la vie réside en grande partie dans la convergence d'outils certes biologiques mais également physiques, informatiques etc. Il devient ainsi crucial de favoriser l'interdisciplinarité au service des futurs produits et services. Là encore, le programme des investissements d'avenir est très propice pour cela, de même que la mise en place d'appels à projets dédiés à certains axes.



76. Ingénierie cellulaire et tissulaire

Définitions

L'ingénierie cellulaire couvre l'ensemble des technologies permettant de produire et d'entretenir des modèles cellulaires, d'optimiser les conditions de culture, de réaliser des transfections et des transplantations et de contrôler les lignées cellulaires. L'ingénierie tissulaire applique les principes de l'ingénierie et des sciences de la vie afin de développer des substituts biologiques qui vont restaurer, maintenir ou améliorer la fonction des tissus.

L'ingénierie cellulaire et tissulaire implique des compétences pluridisciplinaires : science des matériaux, biologie cellulaire, chimie, physique et biomécanique. Ingénieries cellulaire et tissulaire sont intrinsèquement liées : l'ingénierie tissulaire passe par exemple par la combinaison de cellules, de matériaux d'ingénierie et / ou de facteurs biochimiques appropriés. Elles desservent toutes deux le développement de la médecine régénératrice, mais aussi la production de molécules d'intérêt.

Description

La recherche dans le domaine de l'ingénierie tissulaire a beaucoup évolué et il est aujourd'hui possible de reconstruire des tissus humains complets tels que la peau, le cartilage et les ligaments. Les recherches récentes portent sur les biomatériaux comme supports de cellules afin de régénérer des tissus là où l'utilisation seule de biomatériaux n'est pas suffisante. Il s'agit alors d'associer une matrice synthétique biomimétique ou naturelle à des cellules capables de produire, au sein de ces structures, leur propre matrice extracellulaire qui pourra se substituer à ces biomatériaux.

Dans ce cas mais aussi dans celui de l'ingénierie cellulaire en général, les cellules peuvent être autologues (provenant de l'organisme receveur lui-même) ou allogéniques (provenant d'un organisme compatible). Il peut également s'agir de cellules différenciées ou de cellules souches. Les recherches s'orientent davantage sur les cellules souches adultes et embryonnaires, du fait de leurs deux propriétés principales : l'autorenouvellement – elles peuvent se multiplier et donner de nouvelles cellules souches – et la différenciation – elles peuvent produire des cellules spécialisées.

Des verrous technologiques forts subsistent :

- meilleure maîtrise et compréhension des techniques de différenciation cellulaire ;
- développement de dispositifs de transferts des cellules selon les applications ;
- adéquation des propriétés de surface, de dégradabilité, de visco-élasticité, etc. des cellules souches qui se retrouvent dans un environnement tridimensionnel, biochimique et/ou mécanique auquel elles doivent s'adapter ;
- amélioration du taux de survie des cellules implantées, notamment grâce aux nanobiotechnologies et plus largement aux techniques de vectorisation ;
- transformation des cellules en culture en objets industriels dans le but d'une production normée et contrôlée ;
- favorisation de l'approche systématique, notamment par la voie allogénique.

Applications

L'ingénierie cellulaire et tissulaire trouve des applications dans de nombreux secteurs. En santé, la thérapie cellulaire possède un champ d'application vaste : d'intenses développements cliniques existent en immunoncologie, cardiovasculaire, orthopédie, SNC, diabète et peau. Aujourd'hui, une quarantaine de produits est commercialisée dans le monde mais le marché mondial de la thérapie cellulaire et tissulaire est amené à croître et à atteindre 2,7 Md\$ en 2015 [35].

Les cellules souches constituent par ailleurs des outils de recherche permettant d'améliorer la compréhension des facteurs de croissance et de prolifération des cellules. Elles sont également utilisées dans les fécondations *in vitro* vétérinaires.

De plus, l'ingénierie cellulaire et tissulaire permet de développer de nouveaux systèmes de bioproduction, pour tout type de biothérapies mais aussi d'ingrédients utilisables en agroalimentaire ou en cosmétique (à partir de cellules végétales par exemple) et de vecteurs. La maîtrise de l'ingénierie cellulaire et tissulaire est porteuse d'activités de services de bioproduction, de logistique (transport, stockage, conservation) et de galénique.

Enjeux et impacts

De nombreux enjeux subsistent sur les aspects réglementaires et éthiques. Au niveau européen, le règlement « médicaments de thérapie innovante », entré en vigueur en 2008, a pour objectif l'harmonisation des législations d'ici à 2012, mais les réglementations restent strictes et peu claires. Il reste des difficultés d'acceptabilité morale, éthique ou religieuse, même si des progrès ont été accomplis.

Les industriels sont également confrontés à des difficultés de mise en place d'essais (très longs et coûteux), à la complexité du *business model* (pas de vision sur le retour sur investissement, notamment du fait de la complexité logistique), à des problématiques de prix et de remboursement, en particulier face à la concurrence de thérapies « plus simples » (telles que les thérapies ciblées) et à la question de la brevetabilité.

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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



Acteurs

Principaux acteurs français

- **Laboratoires de recherche académique** : AFM, CEA (LTCG, Mircen, LICB), Centre de Primatologie de Brétigny, CHU Hôtel Dieu Nantes, CNRS (CRRET, IPBC), Généthon, Hôpital Necker, Hôpital Saint-Louis, IGBCM, Inra (UMR0792 LISBP), Inserm (UTCG de Nantes, U891), Institut Cochin, Institut Curie, Institut de Biothérapies, Institut de Recherche Biologique, Institut du Thorax, Institut Pasteur, IRB, I-STEM, Laboratoires Génévrier
- **Utilisateurs** : AP-HP (Georges Pompidou, Pitié-Salpêtrière), EFS, Hôpital d'instruction des armées Percy (HIA Percy)
- **Industriels** : ABCell-Bio, Atlantic Bone Screen, Collectis, CellProthera, Clean'Cells, Diana Ingrédients, Ectycell, EndoCells, Episkin, ERYtech Pharma, Genevrier, GenoSafe, Icelltis, MAbgène, Mabio International, Myosix, Natural Implant, Neuronax, Sanofi-Aventis, ScarCell Therapeutics, TBF, Texcell, TxCell, Vivalis
- Structures relais : Atlanpole Biotherapies, Cancer-Bio-Santé, EFS, Medicen

Principaux acteurs étrangers

- **Laboratoires de recherche académique** : California Institute for Regenerative Medicine, Harvard Stem Cell Institute, Hospital Clinic de Barcelona, McGowan Institute for Regenerative Medicine, University of Wisconsin Stem Cell and Regenerative Medicine Center, Wake Forest Institute for Regenerative
- **Industriels** : Advanced Cell Technology, Artelis, AstraZeneca, Bresagen, Cythera, Geron, GSK, Johnson & Johnson, Nestlé, Novartis, Osiris Therapeutics, PAA, Pfizer, Roche, Theregen, TiGenix, ViaCyte

Position relative de la France

La France figure parmi les acteurs majeurs du domaine de la thérapie cellulaire. Elle a été pionnière dans l'application dans les cellules de sang de cordon ombilical et elle se distingue également dans les cellules souches mésenchymateuses et dans les cellules souches adultes. En 2007, le pays est le deuxième pays européen en termes de développement clinique de produits de thérapie cellulaire. La France est également le troisième pays au monde à réaliser des essais cliniques (derrière les États-Unis et l'Allemagne). La France est le premier pays à avoir avancé sur les normes et sera le premier à établir les standards normatifs.

Malgré tout, la France manque d'une masse critique de compétences et d'industriels et la concurrence internationale est déjà très intense, particulièrement aux États-Unis. Par ailleurs, le secteur français ne possède pas de fonds dédiés.

Analyse AFOM

Atouts

Fortes compétences ; acteur notable dans les essais cliniques ; présence de groupes de patients du type AFM ; impact sur les normes ; existence de l'ATU (autorisation temporaire d'utilisation), exception mondiale ; existence d'un appel à projets de l'ANR sur les cellules souches.

Faiblesses

Peu d'industriels (dix sociétés principales de produits de thérapie cellulaire) ; faibles investissements.

Opportunités

Harmonisation européenne de la réglementation ; avancées sur les questions d'éthique ; découverte des iPS création en janvier 2009 du Comité pour les thérapies innovantes (CAT) de l'EMA.

Menaces

Forte concurrence des États-Unis ; brevetabilité ; dimension sociale.

Recommandations

- Poursuivre le travail sur les lois de bioéthique, les dimensions sociales et la brevetabilité.
- Donner les moyens à la France pour qu'elle soit le premier pays à établir des standards et normes notamment en production (déjà une longueur d'avance), pour donner un avantage compétitif majeur aux industries françaises.
- Soutenir les initiatives pour développer une masse critique : encourager les partenariats notamment par le biais d'appels à projets ou FUI (Fonds unique interministériel), de plateformes, prévoir des structures adaptées pour avoir des capacités de production suffisantes.
- Soutenir la mise en place de formations adaptées pour former des techniciens et des ingénieurs (« cultivateurs de cellules » par exemple) : création d'une école française d'ingénierie cellulaire et tissulaire, d'une usine témoin.
- Allonger la durée des dispositifs de soutien financiers aux contraintes de ce domaine.
- Renforcer les accès aux fonds propres des entreprises (entrée de l'État dans le capital, adapter les dispositifs tels qu'InnoBio aux entreprises agroalimentaires et à l'introduction en bourse des entreprises).

Liens avec d'autres technologies clés

1	2	3
7	20	28
77	84	

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



77. Ingénierie génomique

Définitions

L'ingénierie génomique repose sur des disciplines fondamentales abordant les problèmes de base de l'organisation, de la stabilité et de la variation du matériel génétique, de la réplication et de la réparation de l'ADN, ainsi que de la régulation de l'expression et de l'évolution des génomes et enfin la génomique des populations. L'étude de la régulation de l'expression des gènes et des contrôles épigénétiques, omniprésents dans le monde du vivant, représente un enjeu important pour comprendre les fonctions moléculaires de la physiologie cellulaire, la relation génotype-phénotype et les liens entre gènes, environnement et santé.

L'ingénierie génomique trouve de multiples applications, fait appel à des technologies de vectorisation et requiert la présence d'outils puissants d'acquisition et de traitement des données. Elle doit également pouvoir bénéficier du développement de nouvelles techniques d'imagerie.

Description

Le génome peut être manipulé afin de faire pénétrer un ou plusieurs gènes d'intérêt dans les cellules ou les tissus d'un organisme vivant. Le gène peut être introduit selon deux méthodes : *in vivo* et *ex vivo*. Dans la méthode *in vivo*, le gène est directement introduit. Dans la méthode *ex vivo*, les cellules ciblées sont d'abord prélevées puis modifiées génétiquement par l'introduction du gène avant d'être ré-administrées au sein de l'organisme.

De nouvelles recherches sont aujourd'hui développées et reposent, en plus de l'ADN, sur des petits ARN interférents (ARNi). Cette technique de ciblage cellulaire des ARNi permet le blocage des ARN messagers (ARNm) par les ARNi et ainsi la correction du dysfonctionnement d'une protéine.

La transgénése correspond à la modification du génome d'un organisme par génie génétique. Elle peut être réalisée au niveau de micro-organismes, de cellules de plantes ou d'animaux et résulte en un organisme génétiquement modifié.

Le transfert de gènes et la vectorisation sont clés dans la maîtrise de l'ingénierie génomique. Les gènes sont introduits au moyen de vecteurs viraux – vecteurs rétroviraux, adénoviraux ou issus de virus associés aux adénovirus (AAV) par exemple – ou non viraux – plasmides ou vecteurs lipidiques par exemple.

Des verrous technologiques subsistent. Ainsi, malgré les récentes avancées scientifiques, l'insertion du gène n'est pas encore complètement maîtrisée ; pour cela, une meilleure connaissance des voies d'insertion des vecteurs et de la localisation dans le génome du gène introduit est indispensable. Le transfert de gènes doit également être assuré de manière sûre et efficace et garantir la stabilité de l'expression du gène introduit. Par ailleurs, la transgénése était réalisée jusqu'à présent de manière aléatoire ; l'enjeu est de cibler des modifications très précises. Les nouvelles générations de séquenceurs constituent des outils précieux pour cela.

Applications

L'ingénierie génomique trouve de nombreuses applications en agronomie et agroalimentaire. L'enjeu est de répondre aux besoins en termes d'agriculture durable, en développant des variétés requérant moins d'eau et de pesticides, et davantage résistants aux conditions de culture. Il s'agit d'organismes génétiquement modifiés (OGM). La superficie mondiale des cultures génétiquement modifiées est de 134 millions d'hectares en 2009 et devrait croître à 200 millions d'hectares d'ici à 2015 (sur 40 pays) [38].

Sans aller jusqu'aux OGM, l'ingénierie génomique permet également de sélectionner des variétés animales ou végétales présentant des caractéristiques agronomiques d'intérêt. Elle permet également de combiner dans une même souche de bactéries ou de levures les gènes permettant de produire les enzymes capables de transformer la cellulose en éthanol, pour la production de bio-carburants à partir des restes des cultures.

En santé, les pathologies concernées par l'ingénierie génomique sont nombreuses. Les avancées en ingénierie génomique permettent notamment le développement de la thérapie génique. En juin 2010, 1 644 essais cliniques sont en cours dans le monde. La grande majorité de ces essais est en phase I (60,5 %) ; seuls 3,5 % sont en phase III [36]. Le marché mondial de la thérapie génique est estimé à 484 M\$ en 2015 [37]. En avril 2010, aucun produit de thérapie génique n'a encore été approuvé par la Food and Drug Administration (FDA).

En modifiant le génome de certaines espèces animales, il est également possible de produire des biothérapies (par exemple à partir de lapins génétiquement modifiés). Enfin, l'ingénierie génomique est porteuse de services à très haute valeur ajoutée, notamment au travers du séquençage du génome basé sur les nouvelles générations de séquenceurs, mais aussi de services de caractérisation de l'impact et de contrôle qualité de la chirurgie génomique (à l'image des sociétés de service de type immunomonitoring).

Enjeux et impacts

Les enjeux sont tout d'abord médicaux. Le spectre des maladies concernées par la thérapie génique est très large et la thérapie génique favorise le développement de nouveaux traitements médicaux et en particulier de solutions pour certaines maladies incurables à l'heure actuelle (telles que des maladies orphelines). En revanche, si les essais sur les animaux sont porteurs d'espoir, le passage de l'animal à l'homme demande des financements importants et une organisation adaptée.

Il faut également noter des enjeux de durabilité, soit par l'obtention de variétés adaptées aux conditions climatiques et nécessitant moins d'intrants, soit l'obtention de produits autrement qu'à partir de pétrole.

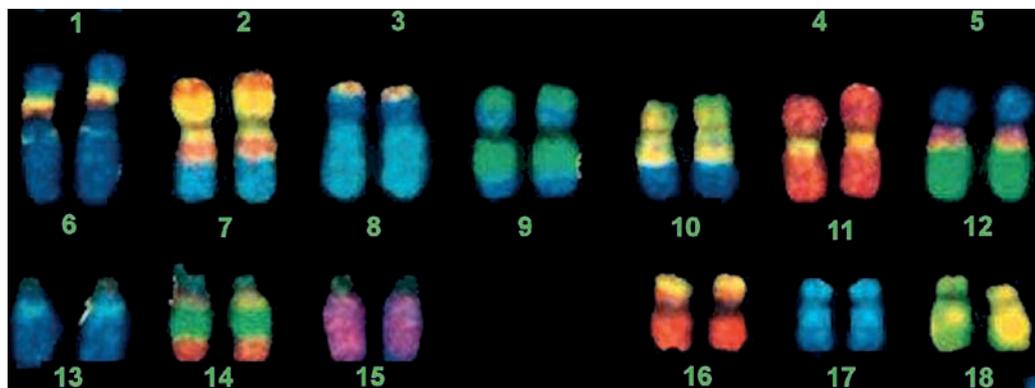
Enfin, les questions éthiques et sociales sont très importantes. Le Comité consultatif national d'éthique (CCNE) s'est exprimé à plusieurs reprises sur la thérapie génique et préconise de limiter les recherches aux seules cellules somatiques et d'exclure les cellules germinales. La société française est également très réfractaire à l'idée de consommer des produits issus d'OGM.

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



Liens avec d'autres technologies clés

1	2	3
20	28	41
76	84	

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : Généthon, Inserm (LTG, UCG Nantes), Institut Pasteur Université Paris Descartes (Département de biothérapie), Transgene
- **Industriels** : Cayla, Collectis, Clean Cells, Genopoiétic, Genosafe, In-Cell-Art, PrimeBiotech
- **Utilisateurs** : Hôpital Necker, Sanofi-Aventis, Limagrain
- **Structures relais** : AFM, Alsace BioValley, Lyonbiopôle, Medicen

Principaux acteurs étrangers

- Avigen, Cell Genesys, Introgen Therapeutics, Genvec, Genzyme Corporation, Pioneer HiBred International, Targeted Genetics Corp, Urogen Pharmaceuticals Inc., Vical (Etats-Unis), Gene Signal (Suisse), AnGes MG (Japon), Oxford BioMedica (Royaume-Uni), Shenzhen SiBiono GeneTech Co., Ltd (China)

Position relative de la France

La France possède une bonne position en recherche avec la présence de plusieurs centres de recherche de pointe en génétique et génomique. En 1999, la France a d'ailleurs été le premier pays à tenter de soigner des bébés privés de défenses immunitaires, dits « bébés-bulles » grâce à la thérapie génique. Des entreprises telles que Transgene ou Collectis se distinguent à un niveau international.

Au niveau des essais cliniques, les États-Unis sont le pays leader et réalisent 62,9 % des essais cliniques en thérapie génique dans le monde. La France, avec 44 essais cliniques en cours – soit 2,7 % – se situe en cinquième position, derrière le Royaume-Uni (11,9 %), l'Allemagne (4,8 %) et la Suisse (2,9 %) [36]. Concernant les applications environnementales et agroalimentaires, la France

est en retard, tant sur la production de biocarburants que sur le recours aux OGM. Ce retard est en grande partie dû aux véritables difficultés d'acceptabilité sociétale.

Analyse AFOM

Atouts

Compétences présentes (centres de recherche de pointe) ; des industriels de niveau international ; force de l'AFM.

Faiblesses

Règlementation ; faibles investissements ; dimensions sociales et éthique ; peu de centres de production de vecteurs significatifs.

Opportunités

Large spectre d'applications ; résultats positifs de certains essais cliniques.

Menaces

Forte concurrence internationale, notamment des États-Unis ; éthique.

Recommandations

- Poursuivre les réflexions réglementaires et éthiques.
- Soutenir la mise en place de centres de production de vecteurs de deuxième génération, tout en favorisant la mutualisation de la demande (engager pour cela un grand programme avec des industriels impliqués).
- Soutenir le développement d'infrastructures type P3, avec des salles blanches et un confinement de grade industriel, accessibles aux PME.
- Soutenir les développements en bio-informatique et la mise en place de formations permettant de posséder le potentiel humain (en bio-informatique et en bioproduction). Adéquation avec les investissements d'avenir.

Maturité (échelle TRL)

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

Position de la France

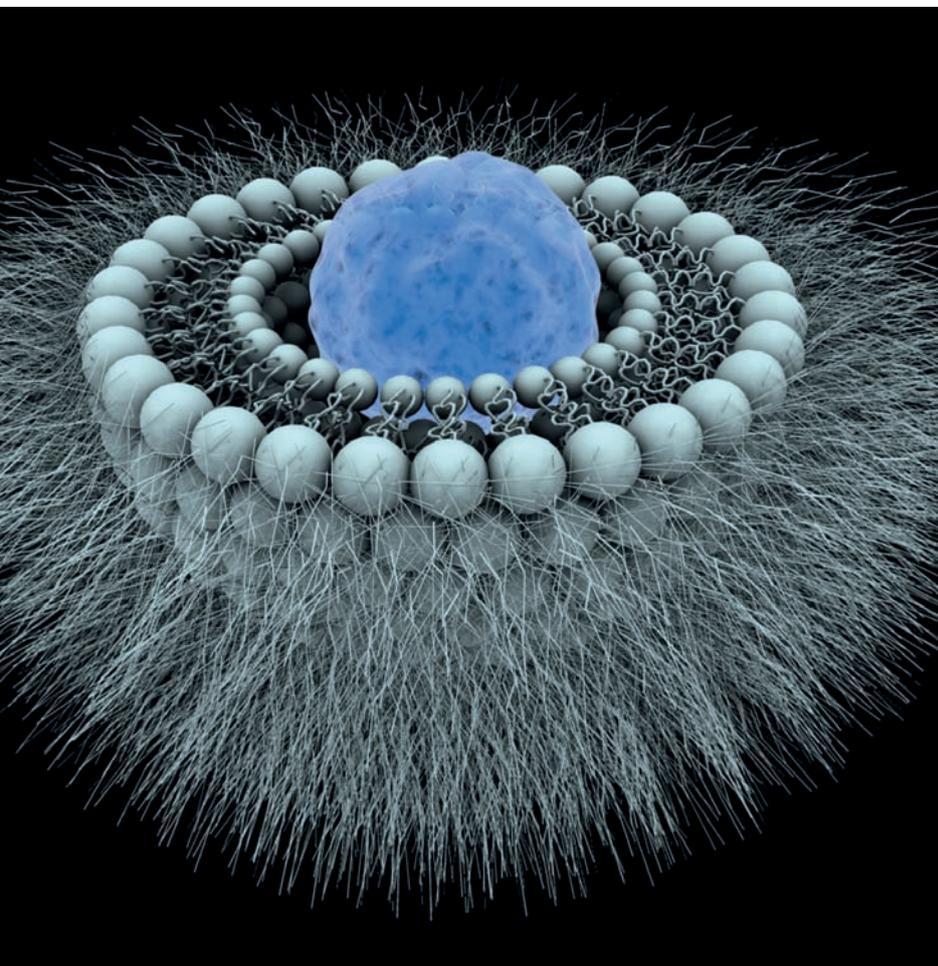
● Leader ou Co-Leader
● Dans le peloton
● En retard

Potentiel d'acteurs en France

● Faible
● Moyen
● Fort



78. Ingénierie du système immunitaire



mental dans l'orientation de la réponse immunitaire et sont reconnues pour être de très bonnes cellules présentatrices d'antigènes. Dans le cas de la recherche de traitement contre le cancer par exemple, le but est d'utiliser cette capacité en associant une cellule dendritique à un antigène d'intérêt d'une tumeur. L'antigène est ensuite présenté à un lymphocyte qui, via le TCR, va reconnaître l'antigène et détruire la tumeur.

La maîtrise de la réponse immunitaire est loin d'être totale, ce qui explique en partie que les thérapies développées aujourd'hui soient le plus souvent personnalisées à chaque cas, et donc extrêmement coûteuses (comme dans le cas des thérapies cellulaires autologues). Il est également nécessaire de mettre en place des approches systématiques, regroupant des analyses à grande échelle du génome, du transcriptome, du protéome et du métabolome et les criblages fonctionnels des cellules du système immunitaire. Le développement de modèles animaux est également nécessaire (murins et grands animaux).

Applications

L'ingénierie du système immunitaire trouve évidemment des applications en santé humaine mais aussi animale, pour développer des stratégies thérapeutiques ou de prévention. L'immunothérapie, les vaccins thérapeutiques et la thérapie cellulaire représentent des champs d'applications majeurs de l'ingénierie du système immunitaire. Celle-ci permet également de définir des stratégies de protection en cas de menaces bioterroristes.

La compréhension du système immunitaire et la capacité à le manipuler touchent par ailleurs un large spectre de pathologies dont : les maladies auto-immunes, les cancers, les maladies infectieuses (Sida, hépatites B et C), les allergies, le diabète etc. L'immunothérapie anticancéreuse constitue par exemple une nouvelle approche potentielle pour le traitement du cancer. Le marché des vaccins croît de 15 à 25 % par an et est estimé à 20 Md€ en 2015 alors qu'il est de 10 Md€ en 2010 [39]. Le marché français de l'industrie de santé animale représente le premier marché européen avec 835 M€ de chiffres d'affaires en France et 1,4 Md€ à l'exportation [6].

Il s'agit d'un champ de recherche porteur, y compris sur le plan de la biologie fondamentale. L'ingénierie du système immunitaire contribue également à l'amélioration des connaissances sur les allergies, à la découverte de biomarqueurs et au développement de produits d'alimentation santé.

Au global, ce domaine est porteur d'activités de service, communes au développement de tout principe / molécule active et spécifiques au domaine des protéines et anticorps.

Description

Le système immunitaire est un système de défense naturel de l'organisme composé d'un réseau complexe de cellules, d'organes et molécules. Il existe deux systèmes immunitaires qui coopèrent l'un avec l'autre : l'immunité « innée » et l'immunité « acquise ».

L'ingénierie du système immunitaire a pour but de comprendre le système immunitaire dans le but de mieux le manipuler. L'objectif principal est de modifier et d'optimiser tous les composants du système immunitaire tels que cellules ou molécules. Il peut par exemple s'agir de trouver de nouveaux anticorps ou de modifier les anticorps existants afin de les rendre plus spécifiques. En vaccinologie, l'immunologie moléculaire et cellulaire permet de concevoir des vaccins sur des bases plus rationnelles et moléculaires.

De nouvelles méthodes d'ingénierie d'éléments du système immunitaire sont aujourd'hui développées, basées notamment sur les cellules dendritiques et les TCR (*T Cell Receptor*). Les cellules dendritiques jouent un rôle fonda-

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Enjeux et impacts

L'ingénierie du système immunitaire est essentielle dans le développement de nouveaux traitements pour certaines pathologies. Elle joue également un rôle majeur en santé publique, notamment dans la prévention du risque sanitaire lors d'épidémies ou de pandémies. 75 % des maladies émergentes chez l'homme étant d'origine animale (selon l'Organisation mondiale de la santé animale), les médicaments vétérinaires visant à prévenir les maladies infectieuses ou parasitaires contribuent à la sécurité sanitaire. Ils contribuent également à la compétitivité de l'élevage (la fièvre aphteuse a coûté au Royaume-Uni 12 Md€), et à la sécurisation de la filière agroalimentaire. Par ailleurs, les aspects réglementaires et éthiques ne sont pas à négliger puisque l'ingénierie du système immunitaire implique en partie l'utilisation de cellules souches. Enfin, les temps de développement de nouvelles thérapies sont très longs – ils peuvent atteindre 10 à 15 ans pour de nouveaux vaccins par exemple – ce qui peut dissuader les potentiels investisseurs d'injecter les capitaux nécessaires au développement de tels produits.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : CNRS (GICC), Inra, Inserm (U768, U783), Institut Curie, Institut Pasteur Université Pierre et Marie Curie
- **Industriels** : Biocytex, Biomérieux, Ceva, Erytech, Génopoint, IDM, Imaxio, Innate Pharma, Merial, Monoclonal Antibodies Therapeutics, Neovacs, P.A.R.I.S., Pierre Fabre, Proteogenix, Sanofi-Aventis, Stallergenes, Transgene, Virbac, Vitoquinol, Vivalis
- **Structures relais** : Alsace BioValley, Lyonbiopôle, Medicen, Réseau Français pour la Santé Animale (RFSA), représentants des filières animales

Principaux acteurs étrangers

- Abbott, Acambis, Amgen, Bavarian Nordic, Baxter, Genzyme, GlaxoSmithKline, Johnson & Johnson, Medigene, Merck, Novartis, Novavax, Pfizer, Roche, Solvay, Wyeth, Xenova

Position relative de la France

La France est en bonne position dans le domaine de l'ingénierie du système immunitaire. Elle possède de réelles forces académiques, notamment avec la présence de l'Institut Pasteur dont les départements, en grande partie, s'intéressent au système immunitaire.

Par ailleurs, la France est très bien positionnée dans le domaine de la vaccinologie. L'écosystème français est particulièrement riche, regroupant des forces croissantes à la fois académiques et industrielles. Ainsi, 253 publications françaises relatives au domaine ont été publiées en 2008 [40] et les industriels français Sanofi-Aventis, Biomérieux et Merial font partie des leaders mondiaux. La France se distingue également par la présence de PME innovantes telles que Neovacs.

La France est le leader du marché des vaccins pour l'homme en Europe, et des raisons historiques et économiques ont fait de la France le deuxième marché de santé animale au monde. Au-delà des vaccins, la France est le premier pays en matière de recherche et de fabrication de médicaments et de réactifs pour les animaux en Europe.

Analyse AFOM

Atouts

Compétences académiques ; des leaders industriels ; des plateformes technologiques.

Faiblesses

Manque de coordination dans la communauté scientifique.

Opportunités

De nombreuses pathologies sans traitement actuellement ; des problématiques de santé publique au cœur des préoccupations (pandémie, etc.).

Menaces

Éthique, acceptabilité ; gestion des crises et impact sur la confiance des consommateurs.

Recommandations

- Faciliter l'interdisciplinarité et la mutualisation des connaissances, par exemple en soutenant la création d'un institut spécialisé en immunologie, à l'instar de l'Institut du cerveau et de la moëlle épinière.
- Encourager la démarche de médecine translationnelle.
- Instaurer ou renforcer des registres nationaux labellisés permettant de recueillir les données essentielles associées aux pathologies concernées.
- Soutenir les recherches économiques et sociales sur les problématiques de santé publique et de gestion des crises.

Liens avec d'autres technologies clés

2

76

77

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



79. Technologies pour la biologie de synthèse

Définitions

La biologie de synthèse est un domaine de recherche très récent et en plein essor, destiné à révolutionner la biologie. Elle peut être définie comme étant l'ingénierie de la biologie et a pour objectif « la conception rationnelle et la construction de systèmes complexes basés sur ou inspirés par le vivant mais dotés de fonctions absentes dans la nature » [41]. Cette perspective d'ingénierie peut s'appliquer à toutes les échelles des structures biologiques – des molécules individuelles aux cellules, tissus et organismes. Le champ d'application est très vaste : santé, chimie, environnement, énergie, agriculture, biomatériaux ou biosécurité. Trois démarches relèvent de la biologie de synthèse :

- construction de systèmes artificiels ayant un comportement spécifié par l'assemblage de briques d'origine naturelle ;
- reconstitution du vivant avec des composants artificiels, pour mieux comprendre la vie et la dynamique évolutive ;
- synthèse de génomes minimaux, pour mieux appréhender les cellules et produire des cellules hautes.

Description

La biologie de synthèse associe le séquençage de l'ADN, la synthèse de cet ADN et la modélisation informatique. Elle peut être organisée selon deux approches différentes : *top-down* ou *bottom-up*. L'approche *top-down* consiste à manipuler le génome d'un être vivant existant afin de le réduire au minimum dans le but de le rendre plus simple et donc plus compréhensible et manipulable. L'approche *bottom-up* consiste à définir et assembler des biobriques (segments d'ADN fonctionnels définis) afin de fabriquer un nouveau génome d'un nouveau type d'être vivant répondant à des spécifications fonctionnelles précises. Sur le plan technologique, les entreprises et laboratoires se focalisent en particulier sur les éléments suivants : la longueur des brins d'ADN qu'ils sont capables de synthétiser, la longueur totale d'assemblage et l'absence d'erreurs dans la séquence produite. Les avancées réalisées sont également très dépendantes des travaux sur la modélisation *in silico* et le calcul intensif.

Applications

En première échéance, la biologie de synthèse donnera de nouvelles clés pour la bioproduction. À plus long terme (au-delà de 10 ans), elle modifiera de nombreux processus de R&D pour tous les champs d'application de la biologie (médicaments personnalisés, détection précoce de certaines pathologies, intervention médicale au niveau moléculaire plutôt que chirurgical). La biologie de synthèse est également très prometteuse pour l'amélioration des procédés de transformation des biocarburants, et pour les biotechnologies blanches (davantage détaillées dans le secteur Chimie-Matériaux-Procédés). Le marché de la biologie de synthèse est en pleine expansion. Évalué entre 30 et 40 M\$ en 2006, le marché de la synthèse pure est estimé à 700 M\$ en 2010 puis à 3 Mds\$ en 2015, avec une croissance annuelle comprise entre 30 et 50 % [42]. Des premiers succès ont déjà été accomplis : technologie VERSANT™ de BayerDiagnostics commercialisée, artémisinine d'hémi-synthèse autorisée par la FDA.

nouvelles espèces biologiques pour identifier des étapes industrielles.

Sur le plan financier, les coûts d'investissement sont très élevés et constituent une forte barrière à l'entrée. De plus, plusieurs débats sont en cours, en particulier sur la création artificielle du vivant, et la confiance des citoyens n'est pas acquise. La biologie de synthèse soulève également des problématiques de propriété intellectuelle et de brevetabilité. Enfin, notons que la biologie de synthèse peut permettre la conception d'armes biologiques et peut ainsi être utilisée à des fins de bioterrorisme.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA (Larsim), CNRS (Bioc, iGEM, iSSB, LTM), Inra, Inserm (U571), UPMC, Institut de biologie intégrative, Institut de science et d'ingénierie supramoléculaires, Institut Cochin de génétique moléculaire, Institut Curie, Institut Gustave Roussy, Laboratoire « Programme d'épigénomique »
- **Structures relais** : Atlanpole Biotherapies, Genopole, Medicen
- **Gene Foundries** : Genosphere
- **Industriels** : AMAbiotics SAS, BioMéthodes, Collectis, Dendrics, Global Bioenergies, Heurisko SAS, Isthmus SARL, METabolic Explorer, Protéus

Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : BioFab Group rassemble des scientifiques des plus grandes universités américaines (MIT, Berkeley, Harvard, Princeton), Venter Institute (Etats-Unis)
- **Gene Foundries** : Blue Heron Biotechnology, Codon Devices, DNA2.0 (Etats-Unis), GeneArt (Allemagne)
- **BioSynTech** : Amyris, Gevo, LS9, Mascoma, ProtoLife, Synthetics Genomics (Etats-Unis)
- **Industriels** : Amyris Biotechnologies, Siemens Healthcare Diagnostics, DuPont

Position relative de la France

Les États-Unis sont les pionniers dans le domaine de la biologie de synthèse. La majeure partie de la recherche est aujourd'hui américaine. Ainsi, 63 % des publications scientifiques portant sur la biologie de synthèse sont issues des institutions américaines ; l'Europe représente seulement 19 % de ces publications [43]. Les pays européens les plus contributeurs sont l'Allemagne qui fournit 35 % des publications, l'Angleterre qui fournit 20 % des publications et la France qui fournit 11 % des publications européennes sur le sujet, soit moins de 2 % des

Degré de diffusion dans l'absolu

	Faible diffusion
	Diffusion croissante
	Généralisation

Degré de diffusion en France

	Faible diffusion
	Diffusion croissante
	Généralisation



Liens avec d'autres technologies clés



publications mondiales. Par ailleurs, 85 % des financements pour des projets de recherche publics dans le monde proviennent des États-Unis. Au niveau académique, la France est donc en retard par rapport au leader américain mais fait partie du trio moteur au niveau européen ; dans tous les cas il s'agit d'un domaine émergent. Au niveau des entreprises, on distingue celles capables de synthétiser à proprement parler les gènes – les *Gene Foundries* – et celles qui utilisent ces gènes afin de produire des applications à haute valeur ajoutée – les *BioSynTechs*. Là également, les États-Unis dominent le secteur. Peu de *Gene Foundries* existent en France ; on peut néanmoins citer Genosphere qui propose des services de synthèse de gènes. Les *BioSynTechs* sont quant à elles moins nombreuses que les *Gene Foundries* et sont une fois de plus quasi exclusivement américaines.

Il existe, en France, un réel réservoir de compétences et de savoir-faire, en particulier avec la présence de nombreux très bons mathématiciens et informaticiens. Certaines personnalités scientifiques françaises jouent par ailleurs un rôle majeur d'acteurs moteurs de la biologie de synthèse sur le plan privé ou académique : quatre équipes sur quinze au monde se trouvent ainsi au Genopole. METabolic Explorer est également le numéro deux mondial.

Analyse AFOM

Atouts

Compétences présentes.

Faiblesses

Faible présence en recherche à l'heure actuelle ; peu d'industriels : un seul *Gene Foundries* français (Genosphere) ; faibles investissements ; faible structuration y compris au niveau académique.

Opportunités

Domaine naissant dans le monde ; investissements européens, notamment dans le cadre du programme-cadre de recherche et développement (PCRD) ; concours iGEM (concours de biologie de synthèse organisé par le MIT).

Menaces

Forte concurrence des États-Unis (domination des *Gene Foundries*) ; brevetabilité et propriété intellectuelle ; éthique.

Recommandations

- Favoriser la structuration de la recherche : définir des appels à projets spécifiques permettant de susciter l'intérêt de la communauté scientifique et ainsi encourager l'innovation, profiter des outils investissements d'avenir.
- Encourager la Commission européenne à afficher stratégiquement la biologie de synthèse pour le PCRD.
- Encourager la définition d'outils d'ingénierie systématiques normalisés et standardisés.
- Favoriser la rencontre entre académiques et industriels pour travailler d'emblée sur des applications industrielles et ainsi appliquer les pratiques de *data mining*.
- Engager des réflexions pour trouver des solutions sur les différentes dimensions sociales et éthiques.

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



80. Systèmes bio-embarqués

Définitions

Les systèmes bio-embarqués incluent des systèmes utilisant des technologies pouvant être intégrées dans un organisme vivant.

On distingue plusieurs types de systèmes bio-embarqués dont :

- les dispositifs implantables actifs sont conçus pour être implantés dans l'organisme et ont pour objectif de suppléer ou contrôler une fonction déficiente par électrostimulation directe des organes ou structures nerveuses en cause (tels des stimulateurs cardiaques implantables ou des implants cochléaires) ou de pouvoir suivre des individus d'espèces en permanence ;
- les organes artificiels consistent dans le remplacement d'organes déficients par des systèmes complexes (électroniques en général). Les organes bioartificiels interagissent quant à eux biologiquement avec l'organisme. Les prothèses sont des dispositifs destinés à remplacer un membre ou une articulation. On distingue les exoprothèses – portées sur le corps – et les endoprothèses – introduites à l'intérieur du corps.

Description

Les systèmes bio-embarqués résultent d'une forte interdisciplinarité : compétences médicales, biologiques, chimiques, physiques (matériaux, mécanique et électronique), microtechniques. Les technologies utilisées sont notamment issues des secteurs de l'aéronautique et des télécommunications.

Les recherches actuelles et futures portent sur les grands axes suivants :

- pour la médecine régénératrice, combiner une partie synthétique – un polymère – avec des cellules différenciées et des cellules souches du patient (exemple de vaisseaux à partir de polymères biodégradables qui se remodelent en artères biologiques fonctionnelles lorsque combinées avec des cellules) ;
- plus largement combiner l'approche système mécanique et système biologique, en couplant avec des principes actifs ou agents thérapeutiques ;
- utiliser des technologies de membranes et de traitement de surface de plus en plus sophistiquées ;
- intégrer dans les systèmes bio-embarqués des capteurs de suivi en temps réel et des logiciels analysant les données et appliquant les décisions résultantes (par exemple pour la délivrance de principes actifs) ;
- mettre au point des systèmes résorbables ne laissant aucun corps étranger quelques mois-années après la mise en place ;
- annihiler les possibilités de rejet ;
- augmenter la durée de vie, en luttant contre les phénomènes de corrosion et de vieillissement, et en dotant les systèmes bio-embarqués d'alimentation en énergie adaptée ;
- augmenter le niveau de fiabilité des systèmes tout en les miniaturisant le plus en possible.

Applications

Les systèmes bio-embarqués possèdent des applications dans tous les domaines de la santé, notamment en chirurgie orthopédique, dentaire et traumatologique, en cardiovasculaire, ainsi que dans le domaine du sport. Le domaine des neurosciences constitue un autre axe de recherche pour le développement de neuroprothèses innovantes. En 2007, 50 millions de personnes dans le monde sont porteuses d'un organe artificiel ou d'une prothèse [44]. Cette tendance va aller en augmentant du fait du vieillissement de la population. De plus, en 2009, près de 8 300 personnes sont en attente d'une greffe et chaque année et 17 millions de personnes dans le monde meurent d'insuffisance cardiaque terminale [45]. Ce sont autant de patients potentiels qui pourraient bénéficier de systèmes bio-embarqués. L'industrie mondiale des dis-

positifs médicaux est quant à elle estimée à 210,2 Md\$ en 2008. Le marché français représente près de 4 % de cette industrie avec 6,2 Md€ [2].

De nombreux autres domaines utilisent des systèmes bio-embarqués. Ceux-ci permettent par exemple de développer de nouveaux modèles mimétiques *in vitro* et *in vivo* en biologie fondamentale. L'agroalimentaire représente également un champ d'application majeur. Ainsi, les systèmes bio-embarqués peuvent aider à l'obtention de réactions enzymatiques plus rapides et également assurer le suivi des ressources telles que les ressources halieutiques.

Ces systèmes sont porteurs de nombreuses activités de service, tout au long de la chaîne de développement.

Enjeux et impacts

Au regard des applications citées ci-dessus, les systèmes bio-embarqués répondent à des enjeux médicaux, de confort de vie, de production et de gestion des ressources durables.

L'enjeu majeur pour le développement des systèmes bio-embarqués réside dans le rapprochement et les synergies entre les différentes disciplines impliquées. Il est également nécessaire que les utilisateurs soient impliqués très tôt, notamment pour les applications santé, pour que les produits soient réellement pensés et conçus de manière translationnelle et s'insèrent ainsi naturellement dans les pratiques médicales.

Il existe également des difficultés à sensibiliser des pionniers pour tester les nouveaux systèmes. Il n'existe par exemple pas de nomenclature au sein des hôpitaux pour financer l'achat de tels prototypes. La réglementation est également hétérogène selon les dispositifs et peu lisible pour les industriels.

Enfin, les questions éthiques ne sont pas à négliger dans ce secteur. En effet, la société doit se prononcer sur le nombre des systèmes bio-embarqués que peut porter un organisme sans qu'il soit considéré comme un « homme bionique ».

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : CEED, Clinique Jouvenet, CNRS (BMBI, LBM), Hôpital Saint-Louis, Ifremer, Institut de la vision, IRPHE, IRD
- **Industriels** : Adocia, Carmat SA, Cleanatech, EADS, Ela Medical, Intelligent Medical Implants, MXM, Ortholine France, ProTip, Stalice Santé / Alcis
- **Structures relais** : Alsace BioValley, CTTM, Eurobiomed

Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : Université de Yale (États-Unis), Institut d'ingénierie biomédicale de Porto (INEB, Portugal), European Competence Biomedical Microdevices
- **Industriels** : Aesculap, Biotronik, Groupe Sorin, Syncardia

Position relative de la France

La France est plutôt en bonne position. Elle possède en effet de fortes compétences dans les technologies aéronautiques, microélectroniques, biologiques et médicales. De plus, le premier cœur artificiel total est actuellement développé en France par Carmat, en partenariat avec le groupe EADS. Le cœur Carmat est actuellement en test sur des bovins et devrait être disponible en 2013.

La France comporte ainsi des initiatives industrielles ou académiques ponctuelles. Le réservoir d'entreprises des dispositifs médicaux est important, mais à ce jour, la France compte peu de grands industriels du domaine, contrairement à l'Allemagne où la Suisse. La France compte ainsi peu de sous-traitants, ceux-ci étant majoritairement localisés près des grands foyers industriels. Plus largement, la France manque de structuration, notamment pour servir l'interdisciplinarité nécessaire.

Analyse AFOM

Atouts

Compétences présentes dans les domaines requis ; premier pays à développer un cœur artificiel.

Faiblesses

Manque de coordination dans la communauté scientifique et d'interdisciplinarité.

Opportunités

Demande croissante compte tenu de l'évolution démographique et des exigences de durabilité.

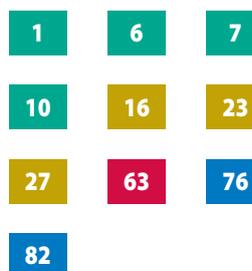
Menaces

Concurrence internationale ; éthique ; réglementation.

Recommandations

- Favoriser l'interdisciplinarité, notamment par la création de plateformes mutualisées innovantes, pour le développement et la démonstration.
- Favoriser le développement de centres d'excellence en médecine translationnelle dans ces domaines, pour favoriser la conception en réponse à une future valeur d'usage, pour anticiper au mieux les démarches réglementaires et accompagner les PME.
- Bonne adéquation des appels à projets dans le cadre des investissements d'avenir ou des plateformes technologiques dans ce cadre.
- Soutenir les réflexions sur la mise en place d'une nomenclature au sein des hôpitaux pour l'acquisition de prototypes innovants.

Liens avec d'autres technologies clés



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



81. Technologies pour la maîtrise des écosystèmes microbiens

Description

L'écosystème microbien désigne l'ensemble formé par une association de microbes et son environnement. Les technologies qui permettent le contrôle de ces écosystèmes microbiens passent notamment par les domaines de l'écologie microbienne et de la métagénomique microbienne ainsi que les outils qui leur sont associés.

L'écologie microbienne s'intéresse au rôle des micro-organismes dans un habitat ainsi qu'aux interactions qui existent entre eux et leur milieu. La métagénomique microbienne consiste en l'analyse collective des gènes d'une population microbienne d'un milieu donné.

L'objectif principal de ces technologies est de comprendre et de maîtriser les écosystèmes microbiens. L'épidémiologie et la microbiologie prévisionnelle peuvent ainsi permettre une meilleure compréhension des mécanismes de génération de microbes, pathogènes ou symbiontes, ainsi que leur mode de comportement afin de faciliter le pilotage de la flore microbienne. La génomique à grande échelle peut par ailleurs aboutir à la découverte d'enzymes microbiennes capables de catalyser des réactions de chimie industrielle de manière économe et non polluante (bioconversions et chimie durable).

Il existe des besoins forts en modélisation et en microbiologie prévisionnelle – méthode quantitative qui vise à évaluer le comportement d'un micro-organisme dans un aliment. Ces sciences permettent en effet d'améliorer la compréhension des écosystèmes microbiens grâce aux modèles mathématiques générés. Ceux-ci permettent de simuler le comportement microbien dans un aliment, en fonction de diverses conditions environnementales rencontrées au cours des différents stades de la vie du produit. Par ailleurs, malgré les progrès accomplis ces dernières années, les domaines de l'intégration des sciences du sol, de la microbiologie et la métagénomique microbienne ne sont pas encore totalement maîtrisés.

Applications

Les applications des technologies pour le contrôle des écosystèmes microbiens se trouvent majoritairement en agroalimentaire. Au niveau des aliments tout d'abord, ces technologies permettent de caractériser plus finement les ferments au sein des aliments. Elles sont également essentielles pour leur conservation. En effet, leur dégradation est surtout due aux germes et savoir les maîtriser afin de conserver l'aliment sous forme comestible le plus longtemps possible est essentiel. Le secteur du prêt-à-consommer en particulier est très concerné par les technologies pour le contrôle des écosystèmes microbiens. Ce marché de la consommation hors domicile représente

en France près de 5,7 millions de repas par an et est en croissance de 10 % par an [46].

Des développements récents s'intéressent par ailleurs à l'introduction volontaire de microbes dans des aliments. Ces aliments deviendraient actifs et interagiraient avec le système immunitaire et les intestins de l'homme. La connaissance et la compréhension de l'écosystème microbien digestif humain et de ses interactions avec l'hôte et l'environnement contribue ainsi à l'amélioration de la santé humaine.

Au niveau agricole ensuite, les technologies pour le contrôle des écosystèmes microbiens sont majeures pour le développement d'engrais naturels. Ce type d'engrais enrichi en micro-organismes permet d'augmenter la biodisponibilité des nutriments du sol et ainsi de stimuler la croissance des plantes. Ce marché porteur va aller en augmentant du fait, en partie, du plan Écophyto, qui prévoit la réduction de moitié des pesticides d'ici à 2018. Aujourd'hui, avec 30 % des quantités totales utilisées, la France est le premier pays de l'UE consommateur de pesticides et le troisième mondial [46]. Il existe par ailleurs un appel à projets en France pour le développement de systèmes naturels de défense des plantes.

Enjeux et impacts

Au niveau alimentaire, l'enjeu est d'améliorer les qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits tout en assurant une meilleure sécurité sanitaire et en rallongeant la durée de péremption des produits.

Au niveau agricole, le défi est de développer de nouvelles stratégies agricoles qui permettent de préserver la qualité des sols et l'environnement tout en maintenant une productivité élevée.

Le séquençage d'un écosystème demande néanmoins des ressources énormes, ce qui représente un frein aux investisseurs potentiels. Actuellement, la majorité des séquençages est réalisée en Chine où les délais de réponse et les coûts sont nettement plus attractifs qu'en Europe.

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

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : ANR (CES, InGEcoH), Cemagref, Cirad, CNRS (LIEBE, MDCEM), École supérieure de microbiologie et sécurité alimentaire de Brest (Esmisab), Enseignement supérieur agricole, Enva, Genoscope, Ifremer, Ina P-G, Inra (EMDS, Laboratoire de recherches fromagères), Institut Pasteur de Lille, Laboratoire d'écologie microbienne de Lyon (EcoMic), Montpellier SupAgro, Unir, Université de Toulouse
- **Industriels** : Agronutrition, Bel, Bonduelle, Bongrain, Danone, Fromageries Bel, Goemar, Pernod Ricard, Veolia Environnement, Villmorin
- Structures relais : Actilait, Adria Développement, Aérial, AgriMip Innovation, Aquimer, Céréales Vallée, IAR, Ifip Institut du porc, Mer Paca, Valorial, Vitagora

Principaux acteurs étrangers

- **R&D** : Agricultural Research Service, Conziglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Ente Nazionale Energie Alternative (ENEA), Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA), Rothamsted Research, Servicios de Investigaciones Agrarias (SIA)
- **Industriels** : General Mills, HIPP, Kellogg's, McCain, Nestlé

Position relative de la France

La France est un pays en pointe dans le domaine des technologies pour le contrôle des écosystèmes microbiens, en Europe et dans le monde. La France se distingue par les projets qu'elle mène, dont le projet Sym'Previus, impliquant des laboratoires, des entreprises membres de l'Unir (Ultrapropre nutrition industrie recherche), des centres techniques Actia (Association de coordination technique pour l'industrie alimentaire) et les pouvoirs publics, qui vise à développer un système regroupant un ensemble d'outils d'aide à l'expertise en sécurité des aliments. Destiné à des professionnels de l'alimentation – des responsables qualité ou des responsables recherche et développement – Sym'Previus utilise des modèles de microbiologie prévisionnelle et a pour but de réduire les durées de mise en œuvre ainsi que le nombre d'épreuves expérimentales.

L'Unir propose par ailleurs un programme « usine sobre » avec un volet « usine sèche ». L'objectif de l'usine sèche est de permettre de limiter voire d'éviter les proliférations de micro-organismes indésirables ayant un impact négatif sur la sécurité sanitaire des aliments. Dans ce cadre, la maîtrise de l'écosystème microbien est assu-

rée par le contrôle de l'humidité. Enfin, la génomique et les biotechnologies végétales font l'objet d'un appel à projets spécifique de l'ANR avec un axe dédié à la génomique microbienne.

Analyse AFOM

Atouts

Compétences présentes en microbiologie prévisionnelle, surtout en recherche ; plusieurs projets en cours dont Sym'Previus.

Faiblesses

Peu de compétences transférées à ce jour au niveau des industriels.

Opportunités

Prise de conscience environnementale ; bonne perception du consommateur ; nombreux produits agroalimentaires utilisant des ferments.

Menaces

Concurrence, notamment anglosaxonne, venant du Royaume-Uni et des États-Unis.

Recommandations

- Faire reconnaître l'outil Sym'Previus comme outil d'excellence en Europe, et l'adapter pour en faire un outil d'auto-apprentissage.
- Accompagner les laboratoires dans leurs recherches et ensuite sensibiliser les industriels.
- S'appuyer sur les centres techniques Actia, les pôles de compétitivité et les Critt pour diffuser les technologies auprès des PME.
- Renforcer l'accessibilité aux dispositifs d'innovation pour les entreprises agroalimentaires.

Liens avec d'autres technologies clés

3

5

77

85

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



82. Capteurs pour le suivi en temps réel

Définitions

Un capteur est un système intégré comprenant le moyen de réaliser une mesure. Les capteurs mentionnés ici permettent un suivi en temps réel, c'est-à-dire continu et immédiat. L'enjeu principal est de rechercher de manière rapide et précise une information sur le comportement ou l'environnement physiologique ou biologique d'un procédé ou d'un produit. Une grande majorité des technologies aujourd'hui utilisées provient des secteurs de l'armement et de l'aéronautique mais les capteurs trouvent des applications multiples en sciences de la vie. Dans ces domaines, les capteurs peuvent prendre des mesures telles que la température, la pression, l'humidité, le débit, le poids, la pression artérielle, l'actimétrie, la glycémie, etc. Développer des capteurs demande ainsi de nombreuses compétences, notamment en : informatique, optique, mécanique, télécommunications, acoustique, matériaux, électronique et micro-électronique.

Description

On distingue plusieurs typologies de capteurs :

- les biocapteurs, incorporant un matériau biologique comme des enzymes ou des anticorps, des cellules ou de l'ADN ;
- les capteurs basés sur un signal électrique (capteurs chimiques potentiométriques, capteurs à polymère conducteur, etc.) ;
- les capteurs basés sur une interaction avec des ondes électromagnétiques ;
- les capteurs basés sur une interaction avec des ondes ultrasonores ;
- les capteurs basés sur des variations de fréquence, ou impliquant des agents sélectifs ;
- les capteurs basés sur des technologies MEMS / MOEMS et NEMS / NOEMS (systèmes respectivement micro et nano-électromécaniques).

Les développements actuels visent à proposer des mesures en continu avec un spectre plus large et une sélectivité plus fine. Ils portent également sur des capteurs (bio) implantables, technologiquement complexes du fait des problématiques de rejet, d'énergie et d'alimentation. Il existe par ailleurs un réel besoin de développer des technologies associant MEMS et NEMS pour servir les futurs besoins de capteurs à très bas coûts des applications grand public et, à plus long terme, des technologies NEMS pour des capteurs d'analyse biochimiques. Le capteur doit être conçu pour une future intégration dans un système global, par lequel l'information traitée est émise sur un réseau de communication sous forme numérique. Des recherches sont ainsi menées sur le développement de systèmes de mesures robustes et fiables, intégrant diverses échelles de temps adaptées aux besoins et pouvant communiquer entre eux, avec des interfaces de lecture simples. D'importantes infrastructures de réseaux (réseaux sans fil, etc.) sont également nécessaires.

Applications

En santé, les capteurs pour le suivi en temps réel trouvent des applications majeures en télésurveillance, c'est-à-dire dans le suivi à distance des paramètres médicaux d'un patient. La télésurveillance s'adresse également à l'assistance aux personnes, notamment aux personnes âgées, pour prévenir le risque de chute ou de fugue par exemple. Le marché de la télémédecine, encore naissant et très fragmenté, est estimé à 1,2 Md€ en Europe et à 90 M€ en France [16]. En défense, les capteurs permettent le télé-suivi du blessé lors de son évacuation et le suivi du personnel opérant sous fortes contraintes (stress, fatigue, etc.).

Les capteurs pour le suivi en temps réel répondent également au besoin de suivi des bioprocédés industriels, aussi bien en agroalimentaire qu'en biotechnologie. Par exemple, la présence d'une bactérie dans un liquide tel que le lait ou la bière peut être rapidement détectée et ainsi permettre les décisions *ad hoc*. Les capteurs peuvent également être utilisés au contact direct des aliments via les emballages. Le marché mondial de ces nouveaux emballages émergents incorporant des capteurs (appelés actifs et intelligents) devrait augmenter de 13 % par an pour atteindre 1,1 Md\$ en 2011, dont 39 % sont consacrés à l'alimentaire [47].

La télédétection en agriculture représente un autre vaste champ d'application. Les capteurs permettent alors de réaliser des mesures utilisées pour l'observation, l'analyse et l'interprétation des surfaces agricoles – plantes, sol, mauvaises herbes, maladies ou climat. Ces informations transformées et analysées peuvent être directement utilisées pour la conduite de cultures.

Enjeux et impacts

En santé, les enjeux économiques et de santé publique sont considérables. Les capteurs biologiques et physiques permettent d'aller vers une prise en charge plus personnalisée et à domicile, et ainsi de contribuer à la réduction significative des dépenses de santé nationales. Certains services de télémédecine et de télésanté dépendront de l'adoption effective de capteurs pour les personnes à domicile.

En agroalimentaire, les capteurs permettent d'améliorer la sécurité sanitaire des aliments tout en assurant une meilleure traçabilité et un meilleur suivi des produits. Plus largement, ils contribuent également à diminuer le coût de revient particulièrement élevé pour les entreprises positionnées sur les bioprocédés industriels (en diminuant les pertes ou en permettant de les traiter plus rapidement).

Les industriels font face à plusieurs enjeux : temps de développement et coûts associés qui peuvent être élevés et difficultés de test et de validation notamment en termes d'accès à des tests cliniques en santé. Par ailleurs, le cadre juridique et législatif peut constituer un frein important. En santé par exemple, malgré la reconnaissance de la télémédecine dans la loi de 2004 et la loi « hôpital, patients, santé et territoires » de 2009, plusieurs textes réglementaires ne sont plus adaptés. Enfin, les capteurs destinés aux personnes peuvent rencontrer des difficultés d'acceptabilité, d'une part, en termes de prix à l'achat et, d'autre part, en termes de respect de la vie privée et de contraintes associées.

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D publique** : CEA (LIST), Enssat (groupe Capt Conception et développement de systèmes de capteurs biologiques et physiologiques), ERT 1052 CBAC, ESIEE Engineering, Inra, Inria, Irisa (Cairn - Traitement du signal), Institut technique des sciences et techniques de l'aliment de Bordeaux, Laboratoire CBAC, Satie Insa de Lyon, UBS (LIMATB – mécanique), UMR Cemagref – Enesad, UMR CNRS 6144 Gepea
- **Industriels** : Absciss, Alpha Mos, Audin, Auxitrol, Calydial, Cryolog, Cyberstar, Diatelic, Mediag, Merial, Orange Healthcare, ORFIDée, Pléiades Technologies, Sanofi Pasteur, SRETT, ST Microelectronics, Tronics
- **Structures relais** : AgriMip Innovation, AgroHall d'Evreux, Aquimer, Cap Digital, Centre de ressources technologiques agroalimentaires (Agir) de Talence, IAR, Lyonbiopôle, Médicen, réseau Actia, System@tic, Valorial, Vitagora

Principaux acteurs étrangers

- CardioMEMS, Cisco, Debiotech, GE Healthcare, Groupe Sorin, Intel, Medtronic, Microsoft, Philips Healthcare, Sensimed, Siemens

Position de la France

La recherche sur les capteurs en santé, et notamment en télémédecine, est particulièrement poussée aux États-Unis. Dans le secteur agroalimentaire, les normes de qualité sont plus drastiques en Europe qu'ailleurs. Elles nécessitent ainsi des mesures de grandeur plus fines et complexes, et rendent les industries plus frileuses aux changements dans leurs procédés de production ou d'emballage.

Au sein de l'Europe, la France possède des acteurs phares tels que ST Microelectronics et des compétences académiques fortes. En revanche, le tissu d'industriels est peu structuré, peu compétitif en termes de coûts de production et manque en particulier d'équipementiers. Si la France a longtemps souffert d'un manque d'ambition et de soutien affiché à l'intégration d'outils tels que les capteurs pour le suivi en temps réel, les initiatives et le soutien se développent. Par exemple, ProPack Food, un réseau mixte technologique, a été mis en place afin de permettre aux industries de l'agroalimentaire et de l'emballage de bénéficier des avancées et travaux de la recherche sur la thématique « procédé-emballage-aliment ».

Analyse AFOM

Atouts

Quelques acteurs industriels phares (ST Microelectronics) et des compétences académiques fortes.

Faiblesses

Manque d'équipementiers ; faiblesse des investissements des utilisateurs ; manque de coordination entre les différentes disciplines requises.

Opportunités

Enjeux forts associés à l'autonomie des personnes et à la sécurité alimentaire.

Menaces

Cadre juridique et législatif contraignant la mise en place des capteurs en temps réel ; concurrence forte venant des États-Unis et du Japon.

Recommandations

- Soutenir les actions collectives, telles que la plateforme Food For Life, qui travaillent activement sur ces sujets.
- Mener des actions de sensibilisation, auprès des entreprises agroalimentaires pour la mise en place de tels capteurs, et auprès de la population pour les applications santé.
- Soutenir le développement de plateformes de démonstration et l'accès à des outils de validation (possible adéquation des appels à projets investissement d'avenir).
- Poursuivre les appels à projets TIC et santé, ainsi que les réflexions sur le cadre juridique et législatif de la télémédecine en général et de la télésurveillance en particulier.

Liens avec d'autres technologies clés



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



83. Technologies de diagnostic rapide

Définitions

Les technologies de diagnostic rapide permettent une rapidité de diagnostic de résultat sur le terrain et peuvent être appliquées dans différents secteurs : santé, agroalimentaire ou environnement. Le diagnostic rapide est accompli par l'utilisation d'instruments automatisés et transportables à la main.

Le développement de ces technologies requiert le recours à des disciplines aussi variées que la génomique, la biologie moléculaire, la bioinformatique, les nanotechnologies, la microfluidique, les capteurs et micropuces ou la fonctionnalisation de matériaux. Il fait également souvent appel aux technologies de miniaturisation et de micro-détection.

Aucune technologie n'est prioritaire, les tests étant réalisés au cas par cas. Si ces systèmes peuvent être focalisés sur un seul paramètre, la tendance est au développement du multiplexage – mesure simultanée de plusieurs paramètres complémentaires. D'autres développements portent sur des systèmes rendant les résultats immédiatement disponibles au sein de fichiers médicaux électroniques.

Description

On distingue plusieurs types de systèmes pour le diagnostic rapide :

- des tests ayant pour support des bandelettes basées sur des membranes, nécessitant une seule goutte d'échantillon ;
- des tests moléculaires ;
- des tests basés sur des technologies « compact disc » ;
- des dispositifs microfluidiques, décrits comme des laboratoires sur puce, permettant d'intégrer, sur une surface de quelques centimètres carrés, l'ensemble des volumineux appareils d'analyse biologique, depuis la préparation des échantillons (séparation cellulaire, extraction de l'ADN, marquage, etc.) jusqu'aux résultats ;
- la PCR temps réel (réaction de polymérisation en chaîne) qui permet en temps réel d'amplifier *in vitro* une séquence génomique spécifique de la présence de la cible recherchée et de détecter simultanément « en temps réel » l'apparition des séquences amplifiées.

Applications

Le diagnostic rapide suscite beaucoup d'intérêt dans le domaine de la santé. De nombreuses pathologies et situations cliniques font l'objet de développement (infections, maladies cardiovasculaires, situations d'urgence et en soins intensifs, etc.). Par ailleurs, pour la défense et la sécurité civile, le diagnostic rapide permet de prendre en charge rapidement un blessé ou une personne malade lors de son évacuation.

Le marché du diagnostic rapide devrait connaître une forte croissance, de 10,5 Md€ en 2008 à 17,7 Md€ en 2013. Il représente 25 % du marché du diagnostic *in vitro* [48]. Toutefois, les technologies de diagnostic rapide ne se restreignent pas au domaine de la santé. Ces technologies sont également applicables au diagnostic d'agents pathogènes sur les chaînes de production, notamment en agroalimentaire, et au diagnostic environnemental. Quel que soit leur champ d'application, les tests de diagnostic rapide contribueront à la diffusion des biomarqueurs, certains ne pouvant être utilisés dans la pratique que sous couvert d'une utilisation possible rapide et sur site. Le manque d'accessibilité à des technologies permettant de recueillir de façon reproductible et sans dégradation les échantillons « sample prep » explique l'échec de certaines stratégies de recherche-validation clinique des biomarqueurs. En 2007, le marché mondial des biomarqueurs était estimé à 5,6 Md\$, avec une croissance annuelle prévue entre 5 et 18 % [49].

Des activités de service sont développées autour de ces technologies, pour le développement des dispositifs, pour l'apport d'expertise dans les domaines d'application, ou pour la validation des outils développés.

Enjeux et impacts

Les technologies pour le diagnostic rapide répondent aux enjeux de :

- réduction de la morbidité et mortalité, en réduisant le temps de réalisation du diagnostic et de prise de décision ;
- réduction des coûts : réduction des temps de prise en charge post-opératoires ou en unité d'urgence ; réduction du nombre de visites des patients à l'hôpital ; plus grande réactivité sur les chaînes de production (production stérile) ;
- sécurité alimentaire et environnementale.

Les systèmes de diagnostic rapide font eux-mêmes face à de nombreux enjeux, auxquels les développements techniques doivent répondre :

- possibilité d'utilisation dans des cadres de prise en charge non traditionnels et éloignés des laboratoires d'analyses médicales ;
- rapidité et coûts de la collecte et préparation de l'échantillon ;
- performance en termes de spécificité, sensibilité, pour différents types d'échantillons ;
- facilité d'interprétation des résultats délivrés ;
- possibilité d'intégrer plusieurs méthodes de mesure en parallèle (acides nucléiques, protéines, etc.) dans le même système, notamment pour permettre le multiplexage ;
- dans le cas des maladies infectieuses, capacité à prendre en compte les mécanismes de résistance ou de virulence accrue ;
- production de masse à bas coût.

D'autres verrous doivent également être levés. Il est ainsi nécessaire de développer des méthodes d'analyse et de contrôle qualité pour la caractérisation, la purification, la stabilité des composants. Des approches doivent également être définies pour déterminer la sécurité et l'efficacité, notamment des nouvelles approches moléculaires appliquées au cadre du diagnostic rapide.

Par ailleurs, il faut encore assurer une prise en charge appropriée, définir les modes et niveaux de remboursement des tests et revoir l'organisation des soins, ce qui peut prendre du temps au regard du conservatisme de certains acteurs tels que les biologistes au sein des laboratoires.

Degré de diffusion dans l'absolu

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

Degré de diffusion en France

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

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA Leti, ISPBL, Laboratoire de microbiologie, LEOM (Laboratoire d'électronique optoélectronique et microsystèmes), SROMB (Laboratoire de synthèse, reconnaissance, organisation moléculaire et biomoléculaire), ST Microelectronics, Université Claude Bernard Lyon 1
- **Industriels** : Antagène, Biomérieux, Elitech, Exonhit Therapeutics, Genesystems, Ingen, Ipsogen, Quotient Diagnostics, Sigma Aldrich France
- **Structures relais** : Alsace BioValley, Cancer-Bio-Santé, Eurobiomed, Lyonbiopôle, Medicen

Principaux acteurs étrangers

- Abbott Point of Care, Becton Dickinson, BioRad, Chembio, Ortho Clinical Diagnostics, Path, Roche Diagnostics, Siemens, Tessarae LLC

Position relative de la France

La France dispose de fortes compétences académiques et d'environ 200 entreprises positionnées sur le diagnostic [6, 9]. Les développements de diagnostic rapide sont essentiellement portés par des laboratoires académiques, des start-up et des PME travaillant sur la convergence de la biologie, des biomatériaux, de la microélectronique et des nanotechnologies. En cela, les acteurs français disposent de moins de ressources marketing, commerciales et de lobbying que les grandes sociétés du diagnostic. Toutefois, Biomérieux, septième acteur mondial du diagnostic, est fortement positionné sur le diagnostic rapide. La position de la France est également variable selon les technologies utilisées. Elle est ainsi en retard dans les laboratoires sur puce, pour lesquels Agilent était le premier. Les États-Unis et le Japon ont globalement une longueur d'avance dans le croisement entre microbiologie, MEMS et microfluidique.

Analyse AFOM

Atouts

Des compétences fortes sur les différentes disciplines impliquées ; un réel tissu d'entreprises innovantes.

Faiblesses

Peu de grands industriels disposant des réseaux commerciaux et de l'influence nécessaire pour avancer sur les verrous d'ordre économique et réglementaire.

Opportunités

De réels besoins pour du diagnostic en temps réel.

Menaces

Conservatisme des filières de prise en charge des patients ; difficultés d'obtention d'un remboursement ; concurrence des acteurs américains et de leurs brevets qui peuvent bloquer l'accès au marché (pour les puces notamment).

Recommandations

- Accélérer les réflexions sur les réglementations à adapter aux technologies de diagnostic rapide, ainsi que sur les prix et le remboursement de ces produits (dans le cas des applications santé).
- Améliorer l'accès à des fonds pour les entreprises développant de telles technologies.
- Encourager les réseaux entre l'ensemble des protagonistes en France pour faciliter leur rapprochement.
- Encourager l'évolution du paysage de la biologie médicale (forces en puissance, capacités de lobbying).

Liens avec d'autres technologies clés

1

18

23

82

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



84. Technologies pour l'imagerie du vivant

Définitions

L'imagerie du vivant regroupe l'ensemble des techniques utilisées pour l'acquisition et la restitution d'images à toutes les échelles du vivant, *in vivo* ou *in vitro*, pour des applications en biologie. Le but de l'imagerie est de créer une représentation visuelle de l'information que l'on cherche à étudier. L'imagerie est réalisée à partir de différents phénomènes physiques et repose sur quatre grandes variétés de technologies : les rayons X, les ultrasons, la résonance magnétique, la tomographie par émission de positons (TEP). On distingue également cinq grands types d'imagerie : l'imagerie anatomique, l'imagerie fonctionnelle, l'imagerie interventionnelle, l'imagerie génomique et l'imagerie nucléaire.

Description

L'imagerie relève de quatre champs technologiques principaux :

- les systèmes de détection dont l'amélioration permet d'augmenter la sensibilité et les résolutions spatiale et temporelle ;
- les technologies de traitement du signal et de l'image qui permettent notamment de superposer des images provenant de plusieurs sources et d'obtenir une vision complète et quasi réelle du patient ;
- les agents d'imagerie ou de contraste (traceurs) qui permettent de fournir des informations biochimiques spécifiques ;
- les technologies qui permettent l'intégration et l'application de l'ensemble des approches méthodologiques afin d'adapter les outils d'imagerie à la résolution de problèmes biologiques et médicaux.

Des développements restent à entreprendre sur l'ensemble de ces champs. Les technologies de traitement du signal et de l'image demandent des vitesses d'acquisition et / ou de traitement de plus en plus rapides et des capacités grandissantes de traitement des flots de données. Par ailleurs, peu de nouveaux agents de contraste sont développés alors qu'il existe de réels besoins. Un autre enjeu clé réside dans la capacité à combiner les différentes méthodes d'imagerie, telles que les rayons X avec la microscopie électronique par exemple.

Applications

L'imagerie du vivant constitue un outil d'investigation de choix dans tous les secteurs d'application de la biologie (santé, agroalimentaire, agriculture), aussi bien en recherche fondamentale qu'en développement de produits. L'imagerie anatomique ou morphologique permet de visualiser les organes, tissus ou cellules à une échelle macro ou microscopique alors que l'imagerie fonctionnelle (dont l'imagerie métabolique et moléculaire) permet d'étudier le fonctionnement de ces mêmes organismes. L'imagerie interventionnelle s'intéresse quant à elle à la chirurgie peu ou non invasive. L'imagerie génomique regroupe les outils informatiques qui permettront de visualiser de façon compréhensible pour un praticien les informations associées au génome d'un patient. L'imagerie nucléaire est utilisée dans la détection d'émissions photoniques de haute intensité pour la médecine nucléaire.

Le secteur de l'imagerie du vivant connaît un essor considérable. Le marché de l'imagerie médicale est de 5,73 Md\$ en 2009 et est estimé à 6,55 Md\$ en 2012 [50]. Le marché de l'imagerie préclinique est quant à lui estimé à 500 M\$

et le marché des instruments pour l'imagerie moléculaire devrait atteindre 6,6 Md\$ en 2014 [51].

Enjeux et impacts

Les enjeux de l'imagerie du vivant sont particulièrement importants en santé. L'imagerie fonctionnelle du cerveau permet par exemple d'améliorer la cartographie des fonctions cérébrales. L'imagerie permet également de mieux comprendre les anomalies de développement et de dysfonctionnement mais aussi de réaliser un suivi de l'efficacité thérapeutique du traitement.

Par ailleurs, l'imagerie du vivant constitue un outil de choix dans le développement de molécules, biomarqueurs et produits, pour comprendre les mécanismes biologiques en jeu, étudier les propriétés, l'efficacité et la sécurité associées. En biologie fondamentale, le défi est d'améliorer les connaissances des bases moléculaires du fonctionnement cellulaire, ce qui résulterait en une meilleure compréhension des organismes vivants. Disposer d'équipements d'imagerie du vivant et des compétences associées peut constituer un facteur très différenciant pour les sociétés de service gravitant autour des industries des sciences du vivant, qui n'ont pas toutes les compétences ou les budgets internes pour développer leurs propres plateformes.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D** : CEA (I²BM, Leti, Irfu, List), Centre de neuro-imagerie, CNRS (IN2P3 et INST2I), CRIBs, ESRF, Etis, Inra, Inserm (LIneM, LTSI, LIF), Inria, Ircad, Insa Lyon, Institut d'imagerie neurofonctionnelle (IFR 49), Institut des neurosciences (IFR 8), Mircen, NeuroSpin, RMN Biomédical et Neurosciences (IFR 1), Service hospitalier Frédéric Joliot, Société française de radiologie, Soleil, Télécom ParisTech, UCP, ESPCI-ParisTech Université de Rennes
- **Intégrateurs** : Biospace, Guerbet, Mauna Kea Technologies, Quidd, SuperSonic Imagine, Theraclion, Trixel
- **Structures relais** : Alsace BioValley, Cancer Bio Santé, Lyonbiopôle, Medicen, System@tic

Principaux acteurs étrangers

- Agfa Healthcare, Bioptics, Digirad, Dillon Technologies, General Electric, MITA (Medical Imaging & Technology), Philips, Siemens

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation



Position relative de la France

La France dispose d'une compétence historique en imagerie du vivant et possède aujourd'hui un ensemble unique au monde de moyens et de compétences en recherche, notamment académique, sur les secteurs de l'imagerie moléculaire et de la modélisation et le traitement des signaux. Des interactions fortes existent également entre les différentes équipes de recherche et développement des domaines clés de la microscopie, en endoscopie et biophotonique. Enfin, plusieurs équipements lourds et plateformes à visibilité internationale tels que le centre de neuro-imagerie NeuroSpin (CEA) et la plateforme d'imagerie Mircen, sont présents sur le sol français, offrant à la France de bonnes capacités en imagerie biomédicale.

Sur le plan industriel, le marché mondial est verrouillé par les trois géants que sont Siemens, Philips et General Electric. Toutefois, de très belles PME françaises se développent, parmi lesquelles pourrait émerger le futur champion français de l'imagerie qui se positionnerait parmi les leaders. SuperSonic Imagine est par exemple aujourd'hui la seule entreprise au monde à proposer un appareil d'imagerie multi-ondes, utilisé en cancérologie. Il faut également noter la position de Guerbet, leader sur le marché des agents de contraste avec 25 % de parts de marché en Europe.

Les pays en pointe en imagerie du vivant sont l'Allemagne, les Pays-Bas et les États-Unis au travers de leurs

trois géants respectifs Siemens, Philips et General Electric. Ces trois entreprises proposent des appareils d'imagerie variés, tels que des scanners ou des systèmes d'imagerie à résonance magnétique (IRM). General Electric propose également des produits d'imagerie interventionnelle. Par ailleurs, la Chine et le Japon sont en pleine explosion, la concurrence internationale s'intensifie.

Analyse AFOM

Atouts

Compétences fortes, notamment académiques ; plusieurs équipements à visibilité internationale ; premier pays à proposer un appareil multi-ondes (SuperSonic Imagine) ; un leader européen des agents de contraste (Guerbet).

Faiblesses

Peu d'industriels présents ; peu de projets collaboratifs ; forts investissements requis.

Opportunités

Nombreuses applications ; nombreux développements encore attendus, notamment vers des échelles d'observation de plus en plus petites.

Menaces

Forte concurrence internationale, notamment avec les trois géants de l'imagerie.

Recommandations

- Structurer les forces de l'imagerie française, en les concentrant sur ses domaines d'expertise reconnus à l'international : optique, technologies ultrasons, aimants pour IRM, détecteurs en physique nucléaire, mathématiques appliquées à l'analyse des données et des images.
- Développer la visibilité des forces françaises, notamment en participant à des initiatives européennes en matière d'imagerie telles que l'Euro-Biolmaging (Esfri) ou l'European Society for Molecular Imaging (Esmi).
- Susciter des projets collaboratifs autour de nouvelles applications et de ruptures technologiques, et en lien avec les organismes de réglementation pour un transfert plus efficace vers des applications cliniques.
- Soutenir le développement des nouvelles sondes et traceurs, ainsi que l'implication des informaticiens et mathématiciens.
- Simplifier l'administration de plateformes d'imagerie françaises.
- Soutenir le développement de bases de données cliniques en imagerie.

Liens avec d'autres technologies clés

2	13	17
18	20	22
76	77	

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



85. Technologies douces d'assainissement

Définitions

Les technologies douces d'assainissement ont pour finalités l'asepsie et la préservation des denrées alimentaires aux différents stades de leur cycle de vie : production, distribution et conservation.

Les enjeux liés à ces technologies sont d'abord d'ordre sanitaire. Elles permettent en effet d'améliorer la sécurité sanitaire des aliments, de les rendre plus sûrs (à court terme) mais également plus sains (à long terme), ainsi que de respecter leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques.

Les exigences réglementaires relatives aux impératifs de sécurité sanitaire et au développement durable sont par ailleurs un facteur de croissance des technologies douces d'assainissement. Celles-ci permettent par exemple de diminuer la consommation des effluents dans les procédés de nettoyage des chaînes de production et donc des polluants. Enfin, en rendant les arrêts de chaîne de production moins fréquents pour cause de nettoyage, ce type de technologie a un impact positif sur la productivité de l'industrie.



Description

Les technologies douces d'assainissement font appel à diverses technologies. Les technologies de traitement de surface permettent, par exemple, de préserver les sols et les installations telles que la chaîne de production, grâce à une modification des surfaces qu'il est possible de rendre bactéricides. Les technologies de confinement permettent, quant à elles, d'éviter la contamination par des poussières par exemple. Enfin, une fois chaque composant de la denrée alimentaire produit séparément, il est nécessaire de les assembler tout en gardant la maîtrise de l'hygiène et de la propreté, ce qui nécessite des technologies d'assemblage adaptées.

Les méthodes de conservation des aliments se font moins agressives et permettent la stérilisation et la décontamination des emballages en ne chauffant pas ou peu l'aliment : les champs électriques pulsés, les hautes pressions et la lumière pulsée qui détruit les micro-organismes en les soumettant aux flashes intenses de lumière en sont des exemples.

Les emballages actifs jouent également un rôle essentiel : ils se trouvent en interaction directe avec l'aliment pour réduire les niveaux d'oxygène, éviter la formation ou préserver les odeurs, augmenter la durée de conservation. On peut distinguer trois types d'emballages actifs : les absorbeurs (d'oxygène, d'humidité, d'éthylène, etc.), les relargueurs d'additifs (anti-microbiens, arôme, etc.) et les préparateurs (actions sur l'aliment pour améliorer sa conservation). Les films alimentaires comestibles permettent par ailleurs de minimiser l'impact des emballages sur

les aliments et peuvent augmenter leur durée de vie. Au niveau technologique, des améliorations doivent encore être réalisées sur la maîtrise des réactions engendrées.

Applications

Les technologies douces d'assainissement trouvent des applications dans tout le secteur de l'agroalimentaire (alimentation humaine et animale). Elles sont appliquées tout d'abord au niveau des usines et des installations industrielles afin de limiter l'usage des produits chimiques. Elles peuvent également être appliquées au niveau des chaînes de production, dans les circuits de réfrigération ou d'aéroréfrigération, par exemple, afin de répondre aux problèmes de nettoyage. Enfin elles peuvent être utilisées au niveau des produits et des emballages afin de préserver au mieux les aliments.

Au niveau de l'emballage par exemple, alors que le marché mondial de l'emballage ne devrait croître que légèrement – de 429 Md\$ en 2009 à 530 Md\$ en 2014 [52] – le marché mondial des nouveaux emballages émergents (actifs et intelligents) devrait augmenter de 13 % par an pour atteindre 1,1 Md\$ en 2011, dont 39 % sont consacrés à l'alimentaire [47]. En France, le marché de l'emballage représente 19,1 Md€ en 2007, dont 66 % sont consommés par l'industrie agroalimentaire [53].

Enjeux et impacts

La sécurité sanitaire est essentielle et son non-respect peut avoir d'importantes conséquences économiques :

Degré de diffusion dans l'absolu

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

Degré de diffusion en France

- Faible diffusion
- Diffusion croissante
- Généralisation

à titre indicatif, le coût annuel relatif au traitement des personnes infectées par la salmonellose est de 2 Md\$ aux États-Unis [52].

Cependant, plusieurs verrous subsistent. La réglementation Novel Food demande que tout produit issu d'une nouvelle technologie fasse l'objet d'une demande d'autorisation de mise sur le marché qui peut prendre de six mois à deux ans, ce qui rend les industriels frileux aux changements dans leurs chaînes de production. De plus, l'industrie agroalimentaire française est très fragmentée, rendant difficile la coordination entre les différents acteurs. La majorité d'entre eux sont par ailleurs des PME, qui ne consacrent qu'un faible pourcentage de leur chiffre d'affaires à la recherche et au développement, d'où de faibles investissements dans le développement de nouvelles technologies douces d'assainissement.

Acteurs

Principaux acteurs français

- **R&D / Intégrateurs** : AgroHall d'Evreux, Centre de ressources technologiques agroalimentaires (Agir) de Talence, Claranor, Cryolog, Inra, Institut des sciences et techniques de l'aliment de Bordeaux
- **Plateformes et pôles de compétitivité** : AgriMip Innovation, Aquimer, Céréales Vallée, Food for Life, IAR, Mer Paca, PEIFL, Plastipolis, réseau Actia, Valorial, Vitagora
- **Utilisateurs** : Agronutrition, Bongrain, Danone, Fromageries Bel, Goëmar, Pernod Ricard, Villmorin

Position de la France

L'industrie agroalimentaire française est le premier secteur national et un leader en Europe et dans le monde, et la France comporte des laboratoires de recherche de pointe. Ces acteurs se sont impliqués très tôt dans le secteur des technologies douces d'assainissement et ont été proactifs dans le domaine.

Des efforts de coordination sont également réalisés, notamment grâce à l'Actia (Association de coordination technique pour l'industrie agroalimentaire) qui se positionne au carrefour de la recherche et de l'entreprise et qui mène des actions collectives d'incitation, de coordination, de maillage et de communication.

Néanmoins, si la France est bien positionnée dans la recherche des technologies douces d'assainissement, le manque d'équipementiers freine leur diffusion parmi les utilisateurs finaux.

Où en sont les autres pays sur la diffusion de cette technologie ?

L'Europe est en général assez avancée dans le domaine, principalement du fait des aspects réglementaires à respecter. Les technologies douces d'assainissement sont diffusantes dans des pays tels que l'Allemagne, l'Angleterre et les Pays-Bas, positionnés au même niveau que la France.

L'Amérique du Sud, et notamment le Chili et l'Argentine, développe également ce type de technologies, permettant ainsi une diffusion croissante.

Aux États-Unis et en Asie néanmoins, les pressions réglementaires sont moins fortes et la recherche et le développement sont moins avancés qu'en Europe, ce qui explique une diffusion moins importante. Notons cependant l'exception du Japon qui a été pionnier sur le développement et la diffusion des technologies douces d'assainissement en agroalimentaire.

Liens avec d'autres technologies clés

6

16

81

82

Analyse AFOM

Atouts

Une industrie agroalimentaire leader européen et mondial ; compétences présentes tant au niveau R&D qu'industriel ; efforts de coordination, notamment grâce à l'Actia.

Faiblesses

Industrie agroalimentaire française très fragmentée : majorité de PME ; faibles investissements en R&D des industriels (PME et TPE).

Opportunités

Fortes pressions réglementaires au niveau français et européen ; faible concurrence européenne.

Menaces

Cadre juridique et législatif, notamment la réglementation Novel Food ; retard par rapport au Japon.

Recommandations

- Soutenir la mise en place de plateformes de démonstration et / ou de centres techniques, pour sensibiliser les PME aux avantages de ces technologies et démontrer le retour sur investissements.
- Adapter les dispositifs de soutien à l'innovation pour davantage d'éligibilité des entreprises agroalimentaires.
- Pousser à l'harmonisation de l'étude des dossiers Novel Food entre les différents pays, pour ne pas pénaliser les acteurs français dans leur volonté d'intégrer des technologies innovantes dans leurs procédés de production.

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