

Des technologies compétitives au service du développement durable

Dans un contexte mondial concurrentiel, la maîtrise de l'innovation technologique apparaît comme un élément déterminant de la compétitivité. S'inscrivant dans une perspective de long terme, elle appelle fréquemment un soutien des États. Mais les financements publics étant de plus en plus rares, il n'est plus envisageable aujourd'hui de soutenir, par des aides pérennes, le déploiement massif d'une technologie non compétitive. L'investissement public, lorsqu'il est nécessaire, doit être adapté à l'état de la technologie : efforts de R&D dans les domaines qui requièrent une rupture technologique, réalisation de démonstrateurs lorsque la faisabilité technique et économique reste à démontrer, et soutien à un déploiement massif seulement lorsqu'une technologie est mature et compétitive. Dans ce dernier cas, au-delà de leurs effets keynésiens,

les investissements réalisés n'auront d'impact positif durable sur notre économie que dans la mesure où ils auront permis la mise en place sur le territoire d'une filière industrielle compétitive et exportatrice. Indéniablement, la France a encore des atouts dans un grand nombre de domaines : il lui appartient par ses choix de favoriser les techniques correspondantes et, par ailleurs, de s'appuyer sur les ruptures technologiques pour développer son industrie sur des segments de marché où elle est peu présente aujourd'hui. Une nouvelle technologie ne pourra cependant se développer que dans la mesure où elle ne suscitera pas de réaction de défiance de la population : à l'État dès lors de créer les procédures d'information et de concertation nécessaires à la mise en place des processus d'encadrement des nouvelles technologies recueillant l'adhésion de nos concitoyens. ■

PROPOSITIONS

- 1 Tenir compte, dans la définition des mécanismes de soutien au développement d'une technologie, de sa maturité technique et économique, de sa capacité d'intégration dans les systèmes existants et du positionnement au niveau mondial de la recherche et de l'industrie françaises.
- 2 Dans le domaine de la production d'électricité, encourager le déploiement des énergies renouvelables compétitives et privilégier, pour celles dont le coût de revient de l'électricité serait supérieur à un seuil à déterminer, les opérations de démonstration et de recherche.
- 3 Compte tenu des différences de prix entre les installations photovoltaïques au sol et en toiture, étendre le concept de bâtiment à énergie positive à un ensemble plus large, l'îlot ou le quartier, afin de bénéficier d'énergies locales à moindre coût.
- 4 Investir dans les technologies transverses : les dispositifs de régulation et de gestion des systèmes (contrôle-commande) et en particulier du bâtiment (réseau domiciliaire) ; les nanotechnologies ; les techniques de mesure (métrologie) ; les TIC ; les matériaux.

LES ENJEUX L'innovation technologique est indispensable pour apporter des réponses pertinentes aux défis économiques, environnementaux et sociaux posés par le développement durable.

La mission de prospective technologique menée par le Centre d'analyse stratégique s'est efforcée d'éclairer cette problématique dans une vision de long terme pour les secteurs de l'énergie, des transports et du bâtiment. Ses travaux, présidés par Jean Bergougnoux, se sont appuyés sur les analyses des progrès technologiques susceptibles d'intervenir au cours des prochaines décennies. Le rapport qui en est issu* tente d'apprécier à la fois la contribution possible de ces progrès technologiques en matière de développement durable et le potentiel de compétitivité de notre pays sur la scène internationale au regard des différentes technologies examinées, qu'il s'agisse de recherche, de développement ou d'industrialisation. La présente note résume les principaux enseignements et recommandations de ces travaux, qui ont cherché à examiner les conditions :

- ▶ d'intégration de ces progrès dans les systèmes et sous-systèmes préexistants (ou à créer) ;
- ▶ d'arrivée à maturité technique, économique mais aussi d'acceptation sociale des différentes technologies analysées.

◀ SATISFAIRE UNE DEMANDE EN ÉNERGIE CROISSANTE, DE MANIÈRE ÉCONOMIQUE ET SÛRE TOUT EN RÉDUISANT SON IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

Quels que soient les progrès envisageables en matière d'utilisation rationnelle des énergies, le développement économique accéléré des pays émergents entraînera inévitablement une croissance soutenue de la demande énergétique mondiale au cours des prochaines décennies. Dans ce contexte, au-delà des nécessaires modifications de nos modes de vie, des progrès technologiques substantiels seront indispensables pour accroître la disponibilité des ressources en énergie primaire et limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ces progrès sont à rechercher dans trois domaines :

- ▶ la production d'électricité et de chaleur ;
- ▶ les transports ;
- ▶ le résidentiel-tertiaire.

Leur développement devra de plus tenir compte – tout au moins à court terme – d'une situation budgétaire publique particulièrement tendue.

◀ PRODUIRE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DE LA CHALEUR TOUT EN ÉMETTANT MOINS DE GAZ À EFFET DE SERRE

(La production décarbonée d'électricité

Des progrès significatifs sont attendus dans les moyens de production d'électricité décarbonée.

■ Le nucléaire et l'hydroélectricité

Pour des technologies matures comme le nucléaire ou l'hydraulique, au-delà de perfectionnements continus, les évolutions technologiques majeures visent, essentiellement dans les pays industrialisés, une meilleure intégration des contraintes environnementales et sociales, tandis que dans les pays émergents l'accent sera essentiellement mis sur la disponibilité de l'énergie. Dans ces secteurs, la France dispose d'une longue expérience sur son territoire et est bien positionnée au niveau mondial – tant en termes de recherche que d'industrie –, pour des marchés d'avenir qui se situent essentiellement dans les pays émergents.

Dans le nucléaire, les évolutions majeures concernent l'amélioration continue des performances des réacteurs actuellement en service, la mise sur le marché de la troisième génération de réacteurs, à des coûts maîtrisés, et le développement de réacteurs à neutrons rapides de génération IV qui devraient permettre d'économiser les ressources d'uranium naturel et de minimiser le volume des déchets ultimes du cycle du combustible nucléaire.

La production hydroélectrique relève de technologies bien maîtrisées même si des améliorations sont encore possibles, notamment pour les turbines de très forte puissance ou pour celles, dites ichtyophiles, minimisant les effets sur la faune aquatique. Le potentiel hydroélectrique susceptible d'être valorisé, modeste en France, est considérable dans d'autres pays du monde (grands fleuves africains, Chine, Inde, etc.).

■ Les énergies renouvelables "nouvelles"

L'éolien terrestre et marin

Les éoliennes terrestres – sous réserve de bénéficier d'un régime de vent favorable – offrent des coûts de production comparables aux prix du marché européen de



* Centre d'analyse stratégique [2012], *Des technologies compétitives au service du développement durable*, rapport de la mission présidée par Jean Bergougnoux, août. www.strategie.gouv.fr/content/rapport-des-technologies-competitives-au-service-du-developpement-durable

l'électricité⁽¹⁾. La technologie peut encore progresser à travers l'accroissement des puissances, mais son développement sera vraisemblablement limité par les réticences du public à l'implantation d'éoliennes de grande taille, tout au moins dans notre pays. L'éolien offshore bénéficie, en général, de vents plus forts et plus réguliers que l'éolien terrestre, et par conséquent d'une plus longue durée de fonctionnement (jusqu'à 3 500 heures par an contre 2 200 pour les éoliennes terrestres). Un éloignement suffisant des côtes permet de mettre en œuvre des éoliennes de plus grande taille, sans gêne visuelle excessive. Mais des progrès importants restent encore à accomplir en termes de coûts de fabrication, de mise en place, de maintenance et de raccordement au réseau continental. Le développement prometteur d'éoliennes "géantes" pose des problèmes techniques redoutables que l'on ne voit guère résolus avant 2030. L'industrie française n'a pas été au cœur du développement des éoliennes terrestres, même si elle a bénéficié de retombées intéressantes en termes de sous-traitance. L'implication des grands industriels français dans le saut technologique que représente l'éolien offshore peut créer une dynamique nouvelle.

Le photovoltaïque

L'électricité photovoltaïque est aujourd'hui compétitive dans les zones bénéficiant d'un fort ensoleillement, d'une demande électrique maximale durant l'été et d'un prix de l'électricité très élevé. Ce n'est pas le cas en France continentale et plus généralement en Europe, hormis peut-être dans les régions les plus méridionales. Ainsi que l'a souligné la mission de l'Inspection générale des finances, "dans le bouquet d'énergie renouvelable développée par la France, le photovoltaïque constitue, de loin, l'énergie la plus chère ramenée au kWh produit ou en termes d'aide publique au kWh produit" : le soutien à la filière représenterait près d'1,5 milliard d'euros de dépense supplémentaire pour le consommateur au titre de l'année 2012 selon la Commission de régulation de l'énergie (CRE). Les progrès, nécessaires, portent sur la diminution des coûts d'investissement (à rendement constant) et l'amélioration des rendements (à coût d'investissement constant), ce qui peut parfois se révéler contradictoire. S'agissant des cellules proprement dites, la technologie des couches minces utilise moins de matière active que celle à base de silicium cristallin et est de ce fait moins coûteuse, mais affiche actuellement un rendement inférieur et une moins bonne stabilité des performances. À long terme, des ruptures technologiques sont possibles (photovoltaïque organique, mise en œuvre des nanotechnologies).

L'horizon de compétitivité du photovoltaïque diffère selon qu'il s'agit de centrales photovoltaïques de forte puis-

sance (plusieurs dizaines de MW) ou de photovoltaïque en toiture résidentielle ou tertiaire. Grâce aux progrès technologiques et à l'élévation des prix du marché de gros européen, les centrales photovoltaïques pourraient devenir compétitives, c'est-à-dire ne plus nécessiter de soutien public aux environs de 2020 : cette perspective doit toutefois être confirmée. Leur inconvénient majeur restera cependant la ressource foncière neutralisée : la centrale de Losse, dans les Landes, occupe ainsi une surface de 317 hectares pour une puissance maximale de 67,2 MWe, ce qui correspond à une densité de puissance par unité de surface jusqu'à soixante fois plus faible par rapport à une centrale nucléaire⁽²⁾.

L'horizon de compétitivité du photovoltaïque en toiture est beaucoup plus lointain et, en l'absence de progrès décisifs, son déploiement à grande échelle, par exemple pour la réalisation de logements à énergie positive, risquerait de se révéler une utopie très onéreuse pour la collectivité.

D'une manière générale, l'appréciation du coût complet des énergies intermittentes est délicate : en plus des coûts de production, il faut prendre en compte les coûts de transport et de distribution, l'impact de leur installation sur le fonctionnement du réseau, les services qu'elles peuvent rendre au système électrique ou au contraire les moyens complémentaires que le système électrique doit mettre en œuvre pour accueillir sa production dès que la puissance installée de ce type d'équipement devient significative.

Les énergies marines et la géothermie

Les technologies permettant d'utiliser des énergies renouvelables assez régulières – comme certaines énergies marines (hydrolienne, énergie thermique des mers) – ou susceptibles d'une production continue – telle la géothermie profonde – sont encore aujourd'hui en France au stade de la recherche ou de l'expérimentation, mais présentent un réel potentiel du fait des atouts naturels de nos territoires et offrent des perspectives technologiques intéressantes sur le long terme. Un déploiement significatif est envisageable avant 2030 pour les hydroliennes, sous réserve naturellement d'un abaissement considérable des coûts. Une diffusion à grande échelle avant 2030 semble en revanche plus hypothétique pour l'énergie thermique des mers ou la géothermie profonde. L'institut France Énergies Marines à Brest a été sélectionné en mars 2012 pour faire partie des instituts d'excellence en matière d'énergie décarbonée (IEED). Cette fédération d'industriels et d'acteurs de la recherche a pour objectif de préparer le développement industriel de la filière des énergies marines à travers la conduite d'activités de recherche, d'expérimentation et de démonstration.

[1] Il s'agit en réalité du marché de gros qui "désigne le marché où l'électricité est négociée [achetée et vendue] avant d'être livrée sur le réseau à destination des clients finals [particuliers ou entreprises]". Définition de la Commission de régulation de l'énergie.

[2] La comparaison a été effectuée ici avec le site nucléaire de Civaux, qui contient les derniers réacteurs mis en service : une capacité totale de production de 2 900 MW sur une surface de 220 hectares.

■ Le captage et le stockage du CO₂

Le captage et le stockage du CO₂ (CSC), qui permet de réduire de manière substantielle les émissions de CO₂ associées à l'utilisation de charbon ou de gaz pour produire de l'électricité, est une technologie d'avenir : le mix français de production d'électricité comporte très peu d'énergies fossiles, mais, au niveau mondial, celles-ci contribuent pour plus de la moitié à la production d'électricité, tendance qui va se renforcer en particulier pour le gaz. Ainsi, le CSC apparaît comme incontournable dans les scénarios actuels de réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale : son déploiement industriel envisagé un temps à l'horizon 2020 ne devrait cependant pas intervenir avant 2030. Même si l'avenir de cette technologie semble limité en France, les enjeux pour notre industrie nationale sont importants pour l'exportation.

📌 La course à la réduction des coûts des ENR

De nombreuses technologies de production d'électricité à partir des énergies renouvelables (mer, vent, soleil) ont aujourd'hui fait la preuve de leur faisabilité technique, mais des progrès restent à accomplir pour réunir les conditions techniques et économiques permettant leur déploiement massif. L'éolien terrestre est proche de la maturité économique, mais la France ne dispose pas aujourd'hui de constructeur de turbines éoliennes de poids sur un marché mondial très concentré, détenu à plus de 80 % par une dizaine d'entreprises. L'éolien offshore, technique plus récente, offre de belles perspectives mais doit fortement réduire ses coûts. Le photovoltaïque, qui a connu un fort développement ces dernières années (avec un marché en progression de 50 % par an depuis 2008), fait appel à des technologies encore trop coûteuses aujourd'hui pour la France continentale : les potentiels d'amélioration des rendements et de diminution des coûts sont substantiels et justifient de conforter et développer la R&D. Les énergies marines sont prometteuses en raison du potentiel naturel disponible en France : les hydroliennes et les technologies de conversion de l'énergie thermique des mers ont le net avantage de fournir une production assez régulière. Un fort accent doit être mis à la fois sur la recherche et sur les opérations de démonstration afin de bâtir les bases du déploiement des filières industrielles françaises produisant ces énergies à des coûts raisonnables.

📌 Le développement des gaz non conventionnels

Aux États-Unis, la révolution des gaz de schiste s'est traduite par une forte diminution des prix du gaz et un regain de compétitivité de l'industrie américaine, en particulier dans le secteur de la chimie. Toutefois, des incidents d'exploitation ont été constatés, notamment sur les plans

environnemental et sanitaire. En France, la loi interdit aujourd'hui l'exploration et l'exploitation sur le territoire national des gisements d'hydrocarbures liquides ou gazeux par forage suivi de fracturation hydraulique et a abrogé les permis exclusifs de recherches comportant des projets ayant recours à cette technique. Le rapport d'avril 2011 du CGEJET et du CGEDD⁽³⁾ souligne d'une part que, dans l'état actuel de nos connaissances, les ressources en gaz et huiles de roche-mère de notre pays restent largement inconnues, faute d'avoir réalisé les travaux de recherche nécessaires à leur estimation, mais que, d'autre part, si ces ressources ne sont pas définitivement prouvées, la comparaison avec les formations géologiques analogues exploitées en Amérique du Nord laisse à penser que notre pays est parmi les pays les plus prometteurs au niveau européen en huiles dans le bassin parisien (100 millions de m³ techniquement exploitables) et en gaz dans le Sud du pays (500 milliards de m³) : ces ressources de gaz non conventionnels représenteraient une amélioration possible de la balance commerciale d'environ 5 milliards d'euros⁽⁴⁾. Une concertation en amont avec l'ensemble des parties prenantes (élus, grand public, experts, industriels et associations environnementales), s'appuyant sur des expertises pluralistes, semble indispensable si l'on veut aboutir à un encadrement partagé de leur développement ou à une décision de non-développement.

📌 La régulation et la sécurité du système électrique

L'introduction dans le système électrique de moyens de production intermittents – éoliens aujourd'hui, photovoltaïques demain – nécessite de prévoir des installations susceptibles de produire de l'électricité à tout moment. Assurer en toute circonstance et au moindre coût l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité devient donc un exercice de plus en plus compliqué.

Fort heureusement, le système électrique français dispose aujourd'hui de tout un arsenal d'usines hydroélectriques dont les capacités de stockage permettent de gérer au mieux ce délicat équilibre : usines dites "de lac"⁽⁵⁾ stockant de l'eau en été pour produire des kWh en hiver au moment où la demande d'électricité est la plus élevée, usines d'éclusées⁽⁶⁾ et stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) permettant une régulation de la production à l'intérieur de la semaine ou de la journée. En cas de besoin, tous ces moyens peuvent être mobilisés simultanément pour faire face à des aléas de grande ampleur. L'introduction des énergies intermittentes pourrait conduire



[3] Leteurtrous J.-P., Pillet D., Durville J.-L. et Gazeau J.-C. [2012], *Les hydrocarbures de roche-mère en France*, Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGEJET), Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), rapport initial, février 2012.

[4] Hypothèses retenues : Exploitation de 20 Gm³ de gaz de roche-mère et 4 Mm³ d'huiles de roche-mère par an ; prix du gaz : 0,18 €/m³ ; prix du pétrole brut : 380 €/m³. Source : *ibid.*, rapport final, p. 28.

[5] Leurs réservoirs ont des durées de remplissage supérieures à 400 heures.

[6] Installations hydrauliques ayant des durées de remplissage de réservoirs comprises entre 2 et 400 heures.

à faire évoluer les caractéristiques de ce système de régulation hydraulique en le complétant par un certain nombre de STEP (des sites possibles existent) ou en modifiant les caractéristiques de certaines usines⁽⁷⁾.

Existera-t-il des technologies de stockage de l'énergie permettant de prendre le relais du stockage hydraulique ou de rendre des services comparables dans des pays peu pourvus en ressources hydroélectriques et en sites favorables au développement de STEP ? D'ores et déjà, le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé dans des cavités souterraines est une technologie maîtrisée, mais son économie est liée à la disponibilité de sites favorables. Le stockage par batterie sur le réseau est aujourd'hui économiquement viable dans des configurations particulières (zones isolées, réseaux insulaires où le coût de production est très contrasté entre le jour et la nuit), mais son coût doit diminuer et ses performances techniques⁽⁸⁾ s'améliorer pour qu'il puisse être déployé massivement dans les réseaux interconnectés des pays industrialisés. Le stockage décentralisé par batterie sur les lieux mêmes de consommation appelle des commentaires similaires, à ceci près qu'il ne bénéficie pas des progrès envisagés dans un avenir relativement proche pour les batteries de forte taille. En revanche, son couplage avec des productions photovoltaïques décentralisées s'imposera sans doute assez naturellement lorsque celles-ci accèderont à la compétitivité économique.

La seconde voie permettant de gérer au mieux l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité est la gestion de la demande ou, pour être plus précis, de la partie de la demande qui peut être reportée⁽⁹⁾, voire interrompue dans certains cas, sans préjudice pour le consommateur. Mises en œuvre avec des moyens techniques simples, les options tarifaires Heures pleines/Heures creuses d'une part, EJP⁽¹⁰⁾ et TEMPO d'autre part, constituent de bons exemples des actions qui peuvent être menées en ce sens. Dans le premier cas, l'objectif est de régulariser les appels de puissance d'une partie des consommateurs en concentrant sur les périodes où la demande est faible un certain nombre d'usages de l'électricité qui peuvent être reportés sans inconvénient. Dans le second cas, il s'agit de mettre à disposition du producteur et du gestionnaire de réseau des possibilités de report ou d'effacement de consommation, sur préavis court, pour faire face à des situations tendues. Il est clair que les *smart grids* du futur, en dialogue avec les outils de régulation-programmation des consommateurs, vont considérablement enrichir ces possibilités de gestion de la demande. Mais ils ne pourront prendre leur plein effet que dans le cadre d'options tarifaires optimisées et incitatives.



[7] Accroissement de la puissance installée à capacité de stockage inchangée.

[8] Compacité (diminution du poids et de l'encombrement) et durée de vie.

[9] On parle alors d'effacement de consommation.

[10] Effacement des jours de pointe.

[11] Le *downsizing* est un concept visant à réduire la cylindrée du moteur sans en dégrader les performances.

Enfin, la variabilité croissante de l'offre et de la demande d'électricité justifie le renforcement des interconnexions nationales et transfrontalières, afin de pouvoir bénéficier autant que possible de la complémentarité des systèmes de production d'électricité en Europe, voire au-delà, ainsi que d'un secours mutuel entre systèmes électriques. Dans un tel contexte, les technologies de transport d'électricité connaissent un regain d'intérêt, en particulier les lignes de transmission à courant continu à haute tension (HVDC). Par rapport au courant alternatif et en dépit de son coût plus élevé, le HVDC entraîne des pertes en ligne plus faibles sur de longues distances, offre la possibilité de relier des réseaux électriques non synchrones (*i.e.* présentant des fréquences différentes) et conduit à un enfouissement plus facile (argument de poids face à la difficile acceptation sociale des lignes aériennes).

La valorisation de la chaleur provenant des énergies thermiques locales

Le potentiel énergétique de la chaleur issue de la biomasse, de la géothermie, ou de la chaleur fatale résultant de procédés industriels ou des eaux usées dans le bâtiment est aujourd'hui insuffisamment exploité. Des améliorations sont possibles dans la production ou la récupération de la chaleur : des centrales de cogénération par gazéification utilisant la biomasse, des capteurs géothermiques moins coûteux et plus performants, des dispositifs de transfert de la chaleur (pompes à chaleur, échangeur) de meilleur rendement énergétique peuvent ainsi être développés. Peu de progrès sont attendus dans l'utilisation de la chaleur, si ce n'est des améliorations progressives de la gestion des réseaux de chaleur.

RENDRE PLUS DURABLE LE SECTEUR DES TRANSPORTS, SOURCE DE POLLUTION LOCALE ET FORTEMENT DÉPENDANT DU PÉTROLE

Face aux enjeux environnementaux et sanitaires, mais également économiques et sociétaux des transports, des évolutions technologiques sont indispensables.

Dans le domaine routier, plusieurs d'entre elles semblent prometteuses.

La première piste et la plus importante repose sur l'amélioration continue des moteurs thermiques. Ceux-ci seront toujours largement présents à l'horizon 2030, mais devraient consommer nettement moins : des gains de 20 % à 40 % d'énergie sont ainsi accessibles, grâce notamment aux progrès liés au *downsizing*⁽¹¹⁾ des moteurs, à des procédés de combustion améliorés, à la mise en place progressive

de systèmes électroniques de contrôle des soupapes et de pilotage des pistons, et à la meilleure gestion de la production et de l'utilisation de l'électricité dans le véhicule.

Deuxième piste majeure : l'électrification progressive du véhicule. Les systèmes *stop & start* coupent ainsi le moteur lorsque la voiture est à l'arrêt (ou, mieux, en dessous de 10-20 km/h) et le redémarrent ensuite : dans les zones congestionnées, ils pourraient réduire les consommations de 20 % à 25 %. Un véhicule à motorisation thermique bénéficiant de *downsizing*, et équipé d'un système *stop & start* et d'un récupérateur d'énergie au freinage, devrait émettre à terme 50-60 gCO₂/km⁽¹²⁾. Les véhicules hybrides, qui associent moteurs thermique et électrique (celui-ci fonctionnant à faible vitesse), devraient pouvoir à terme atteindre 40 gCO₂/km au prix de performances limitées et d'une réduction de leur poids : cette motorisation semble être la voie la plus prometteuse. Le déploiement massif du véhicule électrique suppose l'existence de batteries sûres, fiables, peu chères, disposant d'une autonomie suffisante (environ 200 km) et d'une longue durée de vie. Pour répondre à ces objectifs, des efforts de recherche sont nécessaires (utilisation du silicium à l'anode, mise au point à terme de la batterie lithium-air, etc.). Parallèlement, des progrès sont attendus dans le recours à de nouveaux matériaux et à de nouvelles architectures pour diminuer le poids des véhicules et améliorer leur aérodynamisme.

Le Peugeot 3008 Hybrid4, premier véhicule hybride diesel électrique commercialisé au monde :

Le 3008 Hybrid4, commercialisé par Peugeot depuis février 2012, est une première dans le monde : il s'agit du premier véhicule de série équipé d'une motorisation hybride diesel électrique qui cherche à combiner les performances de la motorisation diesel à l'électrique. L'autonomie en mode tout électrique est de 3 à 4 km et le moteur électrique fonctionne seul au démarrage jusqu'à 60 km/h et lors des phases de décélération. Cette technique pourrait préfigurer l'hybride de demain.

Caractéristiques principales :

- système *stop & start* intégré ;
- moteur thermique : 2,0 l HDi 163ch FAP ;
- moteur électrique : 37 ch ;
- puissance totale : 200 ch ;
- consommation en cycle mixte : 4-4,1 l/100 km ;
- émissions de CO₂ : 104 g/km ;
- poids : 1 660 kg.

Troisième piste : le recours aux biocarburants. Le bilan des biocarburants de première génération semble de plus en plus mitigé : leurs émissions de gaz à effet de serre sont, hormis pour la canne à sucre, proches de celles des carbu-

rants classiques lorsque l'on tient compte des impacts liés au changement d'affectation des sols. En outre, dans certains cas leur culture peut entraîner une hausse des prix des produits alimentaires, ainsi que l'a montré l'envolée des prix du maïs aux États-Unis en 2008. Les biocarburants de deuxième génération répondent à ces critiques : la production peut s'effectuer à partir de la plante entière et de cultures non destinées à l'alimentation. La voie biochimique (hydrolyse et fermentation), qui permet la production d'éthanol, est plus avancée que la voie thermo-chimique (thermolyse et synthèse Fischer-Tropsch) qui permet la production de diesel et de kérosène. La poursuite des efforts de R&D et la réalisation de démonstrateurs permettant d'en apprécier la faisabilité technique et économique sont les priorités principales : le recours massif aux biocarburants de deuxième génération serait extrêmement coûteux aujourd'hui. La troisième génération de biocarburants, qui repose essentiellement sur l'exploitation de ressources algales, est aujourd'hui confrontée à des verrous scientifiques et techniques importants mais permettrait à terme de lever les compétitions pour les usages des sols.

Le démonstrateur FUTUROL⁽¹³⁾, démarré en France en 2008

Le projet Futurol vise le développement du bioéthanol de deuxième génération, avec pour ambition une commercialisation de ce carburant en 2016. L'usine pilote, qui aura une capacité de production annuelle de 180 000 litres d'éthanol lignocellulosique, a été inaugurée en octobre 2011 dans la Marne. Elle permettra de valider, dans une unité de taille réduite [1/1 000 par rapport à l'échelle industrielle] et dans des conditions réelles, les résultats obtenus en laboratoire. Parmi les enjeux majeurs :

- disposer de prétraitements adaptés à une large variété de biomasses afin que le procédé puisse être utilisé dans un maximum de pays ;
- produire de manière intégrée les enzymes et les levures permettant de transformer tous les sucres fermentescibles des branches et des tiges en éthanol ;
- valoriser la lignine contenue dans la biomasse comme source d'énergie intégrée dans le procédé de l'usine.

L'optimisation du procédé, grâce aux opérations menées à l'aide du démonstrateur, pourrait en abaisser substantiellement le coût et permettre son développement industriel.

Quelques données clés :

Durée du projet : huit ans
 Montant du projet : 74 M€
 Phase pilote : 2011-2014
 Phase prototype : 2015-2016
 Développement commercial et industriel : horizon 2016-2020

[12] En France, les émissions de CO₂ des véhicules neufs se situent, en moyenne, autour de 130 g/km.

[13] Ce projet est porté par onze partenaires : ARD, IFPEN, INRA, Lesaffre, Champagne Céréales, ONF, Tereos, Total, Crédit agricole Nord-Est, CGB, Unigrains

Dans le secteur aérien, des innovations sont nécessaires afin de réduire la consommation énergétique des appareils et de développer des nouveaux carburants à plus faible impact environnemental. À court terme, des améliorations portant sur le cycle de combustion du moteur et sur l'usage de matériaux composites peuvent être envisagées. Parallèlement, l'optimisation des plans de vols et des circulations au sol des avions, permise entre autres par les TIC, pourrait entraîner une réduction de 11 % de la consommation d'énergie des appareils à l'horizon 2020. À plus long terme, les travaux porteront sur le développement de nouvelles architectures de moteur (moteur *Open Rotor* : 20 % de réduction de consommation, horizon 2020, et moteur à cycle de combustion variable : 20 %, horizon 2030), sur la création de structures innovantes : avions à mi-chemin entre la structure triangulaire de l'aile volante et de l'avion classique à fuselage cylindrique (*Hybrid Wing Body* : 25 %, horizon 2030), ainsi que sur des moyens de production et de gestion de l'énergie à bord novateurs (piles à combustibles : 5 %, horizon 2030). En intégrant ces différents paramètres, la consommation de Jet Fuel d'un avion pourrait être réduite de 50 % à l'horizon 2030.

Les innovations en matière de logistique et de gestion du trafic sont centrales, et reposeront principalement sur les TIC : elles permettent d'optimiser le trafic (de marchandises ou de voyageurs) pour un mode de transport donné, mais également de pouvoir mieux coupler des modes de transport différents (par exemple, grâce à des systèmes d'information multimodale pour le transport de passagers).

❖ LE RÉSIDENTIEL-TERTIAIRE : RÉDUIRE LES BESOINS THERMIQUES TOUT EN RÉGULANT CEUX EN ÉLECTRICITÉ SPÉCIFIQUE, FORTEMENT CROISSANTS

Le secteur du bâtiment à usage résidentiel et tertiaire est le plus gros consommateur d'énergie en France (42 % de la consommation d'énergie finale). Ses émissions directes de CO₂⁽¹⁴⁾ représentent 26 % des émissions françaises.

Les enjeux de la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment sont donc importants, mais la diversité même du parc immobilier (maisons individuelles, immeubles d'habitation collectifs, grandes surfaces commerciales, locaux à usage tertiaire, etc.) et de ses fonctions justifie inévitablement des approches spécifiques.

Chaque bâtiment est un cas singulier au regard de sa situation géographique, de son utilisation et de son histoire. En particulier, la date de construction est un élément

déterminant des matériaux et procédés employés et, dans une certaine mesure, des choix énergétiques qui ont été effectués lors de sa mise en service. De plus, les bâtiments ont une longue durée de vie : le taux annuel de renouvellement du parc immobilier en France n'est que très légèrement supérieur à 1 %. Ainsi, l'amélioration des performances énergétiques du secteur passera certes par l'amélioration des performances des bâtiments à construire mais, plus encore, par celle des bâtiments existants.

Les besoins énergétiques du bâtiment résultent, en proportions variables, de deux catégories d'usages :

- ▶ les usages thermiques : chauffage et refroidissement, eau chaude sanitaire et cuisson. Ils représentent aujourd'hui un peu plus des trois-quarts de la consommation des secteurs résidentiel et tertiaire ;
- ▶ les usages spécifiques de l'électricité : éclairage, appareils électriques domestiques et professionnels, audiovisuel, informatique et, demain, la recharge des véhicules électriques. La consommation de ces usages est en forte croissance, la multiplication des applications et des appareils l'emportant sur la réduction des consommations unitaires.

La définition des politiques d'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel et tertiaire doit tenir compte de la logique de l'utilisateur. Celui-ci attend du bâtiment un certain nombre de services qui s'apprécient en termes de fonctionnalités, de confort, de sécurité, de protection de la santé : l'économie d'énergie n'est pas une fin en soi. Il sera donc dans une logique permanente d'arbitrage entre services rendus et facture énergétique, ce qui n'ira pas toujours dans le sens de la minimalisation des consommations d'énergie. Plus que l'économie d'énergie, l'objectif à viser est donc sans doute son utilisation rationnelle. En particulier, les investissements d'économie d'énergie dans l'existant doivent présenter une attractivité suffisante pour le particulier ou le professionnel (temps de retour, facilité de mise en œuvre) afin d'éviter d'avoir à recourir à des aides massives de l'État ou à des contraintes réglementaires inadaptées, ce qui, dans les deux cas, conduirait à une allocation inefficace de la ressource rare que constitue le capital.

L'innovation technologique, en réduisant le coût des solutions de maîtrise des énergies ou en améliorant leur performance à coût constant, doit permettre de réduire ces contradictions.

Même si les technologies à mettre en œuvre sont souvent très proches, les problématiques dans la construction neuve et dans la rénovation de l'existant sont sensiblement différentes.



[14] Les émissions de CO₂ liées à la production de l'électricité consommée dans le bâtiment sont comptabilisées dans les émissions du secteur électrique.

Une construction neuve peut être pensée d'emblée comme un système cohérent intégrant les progrès, voire les sauts technologiques, qui peuvent être accomplis dans l'architecture du bâtiment, la qualité du bâti, les équipements d'utilisation, de stockage et de production de l'énergie, la régulation et la programmation des consommations d'énergie et, à terme, le dialogue *via* les *smart grids* avec le réseau électrique. Les pistes de progrès à moyen-long terme semblent identifiables et, pour certaines d'entre elles, déjà ouvertes. Pour ne prendre que quelques exemples :

- ▶ Grâce, en particulier, aux matériaux nanostructurés, la qualité thermique du bâti va pouvoir être améliorée à des coûts raisonnables (meilleures performances thermiques des matériaux de construction eux-mêmes, isolants thermiques en couche mince faciles à mettre en œuvre, vitrages "intelligents").
- ▶ Les pompes à chaleur, qu'il s'agisse de chauffage des locaux, de chauffage de l'eau, de climatisation, de valorisation des énergies à faible ou moyenne température, ont encore un potentiel de progrès important. Les techniques de micro-cogénération peuvent également connaître un développement substantiel.
- ▶ En matière de stockage de l'énergie, le stockage par batterie de l'énergie électrique est sans doute une vision de très long terme. En revanche, le stockage de l'énergie sous forme thermique résulte mécaniquement de l'inertie thermique de bâtiments très bien isolés. Les effets de cette inertie pourraient être encore renforcés par l'utilisation de matériaux à changement de phase, qui peuvent accumuler ou restituer de l'énergie en changeant d'état (liquide-solide) en fonction de la température.
- ▶ La mise en œuvre du photovoltaïque intégré au bâti est, très probablement, une solution d'avenir, mais des progrès importants, en particulier en termes de coût, sont nécessaires pour qu'elle puisse se développer sans subventions importantes.
- ▶ La génération actuelle des ampoules basse consommation, qui a fait l'objet de nombreuses critiques, souvent pertinentes, sera vite dépassée. L'optimisation de l'utilisation des LED sera la prochaine étape.
- ▶ L'intégration dans un système cohérent de ces diverses technologies est tout aussi importante que l'amélioration des technologies elles-mêmes. Des progrès substantiels peuvent être apportés par un pilotage fin de l'ensemble des besoins et des usages. L'intégration de la gestion des flux énergétiques dans un réseau domiciliaire gérant l'ensemble des fonctions du logement ou du bâtiment et dialoguant avec les acteurs du système électrique (gestionnaires de réseaux et fournisseurs

d'énergie) est sans aucun doute une solution d'avenir, mais des travaux importants seront nécessaires pour son implémentation à grande échelle.

S'agissant de la rénovation des bâtiments existants, un certain nombre d'investissements d'économie d'énergie présentent, d'ores et déjà, des temps de retour acceptables, à condition de les réaliser dans le bon ordre sous peine de voir la rentabilité du projet diminuer. Ils concernent pour l'essentiel tout ce qui se rapporte à l'amélioration de la régulation, au remplacement d'équipements existants par des appareils plus modernes et, dans certains cas, à la mise en œuvre de systèmes "biénergie"⁽¹⁵⁾ optimisés. Ces investissements bénéficieront des progrès technologiques attendus sur les équipements d'utilisation des énergies et les méthodes de régulation. En revanche, avec les technologies actuelles, les interventions sur le bâti – si l'on excepte le calfeutrage des fenêtres et l'isolation des combles – présentent des temps de retour prohibitifs. Sous le double effet du renchérissement des prix des énergies et de l'émergence de nouvelles techniques d'isolation en couche mince, les opérations d'isolation thermique, que ce soit par l'intérieur ou l'extérieur, pourraient devenir plus praticables et économiquement attractives pour l'utilisateur du bâtiment.

Les super-isolants minces

Une isolation thermique performante est le moyen le plus efficace pour réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment. Avec les isolants traditionnels (laine de verre, polystyrène expansé, etc.), il faut 20-30 cm d'épaisseur d'isolant sur les murs – voire 40 cm pour une maison passive – pour obtenir des résultats satisfaisants. Une telle augmentation d'épaisseur est un frein majeur, notamment du point de vue foncier. Deux technologies émergentes, les aérogels et les panneaux isolants sous vide (PIV), semblent particulièrement prometteuses pour répondre au problème de perte de surface utile. Ces matériaux, très coûteux aujourd'hui, sont trois à dix fois plus performants que les isolants classiques à épaisseur égale. Les aérogels sont des matériaux nanostructurés, poreux à plus de 99 % : ceux de silice, les plus utilisés, sont translucides et pourraient donc également servir à isoler les vitrages. Les PIV fonctionnent sur le principe d'une bouteille thermos en utilisant les propriétés isolantes du vide.

LES PROPOSITIONS

Un des enseignements de l'exercice est que la prospective technologique reste, en France, très émiétée, ce qui rend difficile une approche systémique pourtant indispensable ainsi que la constitution de bases de données validées et partagées sur le coût et les performances des technologies.



(15) Le concept de "biénergie" fait référence au recours à deux sources d'énergie distinctes, dont au moins une énergie renouvelable, pour répondre aux besoins thermiques : c'est le cas par exemple d'une pompe à chaleur associée à une chaudière à gaz.

PROPOSITION 1

Tenir compte, dans la définition des mécanismes de soutien au développement d'une technologie, de sa maturité technique et économique, de sa capacité d'intégration dans les systèmes existants et du positionnement au niveau mondial de la recherche et de l'industrie françaises.

■ La maturité technique et économique

Dans la vie d'une innovation technologique, il y a plusieurs stades : la R&D, la démonstration de la faisabilité technique et économique, le déploiement à échelle industrielle. Chacun d'entre eux appelle des mécanismes de soutien appropriés dans le cadre d'un pilotage adaptatif : fonds de soutien à la R&D, aide à la réalisation de démonstrateurs, aide aux premiers pas du déploiement. Il ne sert à rien de brûler les étapes en soutenant prématurément le déploiement à grande échelle d'une technologie qui est encore éloignée de la compétitivité économique.

■ La capacité d'intégration dans les systèmes existants

Puisqu'une technologie vient nécessairement s'insérer dans un système existant caractérisé, sur les plans technique et économique, par des opportunités et des contraintes spécifiques, un élément important est l'analyse des conditions de cette intégration. Par exemple, l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique semble offrir des perspectives séduisantes : il peut être produit à partir de sources d'énergie primaire multiples et décarbonées et, au-delà de ses usages traditionnels en chimie et pétrochimie, il pourrait être valorisé dans de nombreux usages énergétiques (applications mobiles pour alimenter les véhicules, applications stationnaires dans le bâtiment pour la production d'électricité, combinée ou non avec la production de chaleur). Malheureusement, l'analyse systémique montre que toutes les chaînes "production-transport-stockage-utilisation à des fins énergétiques" (notamment dans des piles à combustible) employant l'hydrogène comme vecteur intermédiaire envisageables à ce jour sont, même en supposant certaines difficultés techniques résolues, dominées par des chaînes énergétiques présentant un meilleur rendement et/ou des coûts d'investissement plus faibles. Des sauts technologiques sont certes possibles, mais cela repousse, en tout état de cause, bien loin le développement, au demeurant hypothétique, de l'hydrogène-vecteur énergétique à échelle industrielle.

■ Le positionnement au niveau mondial de la recherche et de l'industrie françaises

La conception et la mise en œuvre de mécanismes de soutien adaptés supposent une bonne connaissance préalable des forces et faiblesses de la recherche et du tissu industriel français, grandes entreprises et PME.

Avec beaucoup de prudence, et sans souci excessif d'exhaustivité, il est possible de broser à grands traits un état des lieux des filières qui constituent aujourd'hui pour la France, dans les domaines qui nous concernent ici, des points forts en matière d'innovation technologique au service de la compétitivité :

- ▶ pour l'énergie : prospection et exploitation des gisements d'hydrocarbures, grandes centrales de production électrique, turbines hydrauliques, matériels de réseaux de transport et de distribution ;
- ▶ pour les transports : aéronautique au sens large (avions civils et militaires, hélicoptères, aérospatial), véhicules de faible consommation, équipements automobiles, grande vitesse ferroviaire, transports urbains, constructions navales de haut de gamme ;
- ▶ pour le bâtiment : isolation thermique, verres et vitrages ;
- ▶ pour les technologies transverses : métrologie, contrôle-commande et régulation.

Il convient de conforter ces points forts en soutenant les actions de recherche publiques et privées qui prépareront les futures avancées technologiques dans ces filières, en encourageant les PME innovantes du secteur, en veillant à ce que les réglementations favorisent le développement d'un marché intérieur où les technologies en cause puissent prospérer, et en accompagnant les efforts à l'exportation de toutes les entreprises de la filière (les grandes entreprises, certes, mais, plus encore, les PME innovantes).

En approfondissant la liste qui précède, on se rend compte qu'un certain nombre de technologies porteuses d'avenir, plus ou moins matures, n'y figurent pas, même si de grandes entreprises françaises s'intéressent de près à certaines d'entre elles : éolien, photovoltaïque, capture et stockage du CO₂, batteries de forte puissance en réseau, matériaux de construction nanostructurés, fondations et sondes géothermiques pour l'utilisation de la chaleur du sous-sol dans le bâtiment, technologie des LED pour l'éclairage, etc. Chaque cas mériterait d'être analysé mais, *in fine*, la même question se reposera : faut-il tenter de créer une filière française dans des domaines où l'industrie française est peu présente aujourd'hui ou risque de ne pas être présente lorsque le marché se développera ? Même si l'on a envie de répondre positivement, il faut avoir conscience qu'il est très difficile de s'introduire sur un marché mature ou même de combler un retard dans la maîtrise d'une technologie nouvelle lorsqu'elle est proche de la maturité. En revanche, être précurseur dans la détection et la valorisation bien organisée d'un saut technologique dans un domaine où l'on était absent pourrait permettre de rentrer avec succès sur de nouveaux marchés prometteurs. Or, notre pays bénéficie dans cette perspective d'un avantage concurrentiel important : une recherche publique (CNRS, CEA...) et privée de grande qualité, même dans des disciplines que l'industrie fran-

çaise a encore insuffisamment valorisées (optoélectronique, nanotechnologies, etc.). De plus, les soutiens publics, qui permettent aux entreprises de développer la recherche et l'innovation, y sont également importants, ainsi qu'en témoignent des mesures comme le Crédit d'impôt recherche ou le programme "Investissement d'avenir". C'est en s'appuyant sur cette base scientifique que, le moment venu, la mise à profit d'un saut technologique est susceptible de permettre le développement d'une filière compétitive. Une autre stratégie, plus onéreuse, consiste à acheter la technologie au bon moment par l'acquisition d'une entreprise qui la maîtrise. Cela peut permettre à la France de rattraper son retard, par exemple dans l'éolien terrestre ou le solaire photovoltaïque.

PROPOSITION 2

Dans le domaine de la production d'électricité, encourager le déploiement des énergies renouvelables compétitives et privilégier, pour celles dont le coût de revient de l'électricité serait supérieur à un seuil à déterminer, les opérations de démonstration et de recherche.

Afin d'assurer un approvisionnement durable, à moindre coût et sûr en énergie, il est souhaitable de disposer à terme de moyens de production d'électricité à partir de sources renouvelables et de dispositifs de stockage à des coûts raisonnables. Ces technologies sont aujourd'hui pour la plupart connues et, bien que les estimations de coûts soient assez variables, deux certitudes au moins apparaissent :

- ▶ elles sont plus chères que les technologies mises en œuvre actuellement, voire, pour certaines qui présentent un intérêt majeur à long terme (solaire photovoltaïque, batteries électrochimiques), beaucoup plus chères dans l'état actuel de la technologie ;
- ▶ des progrès technologiques importants résultant d'investissements judicieux et soutenus en R&D sont susceptibles de modifier radicalement les équations économiques d'aujourd'hui.

Leur développement se heurte toutefois à des contraintes budgétaires de plus en plus fortes. Garantir un soutien pérenne à ces technologies suppose par conséquent le respect d'une méthodologie rigoureuse. Comme cela a été dit dans la proposition précédente, les mesures de soutien accordées au développement des technologies permettant d'exploiter les énergies renouvelables doivent être adaptées à la maturité technique et économique de celles-ci. Il faudrait ainsi :

- ▶ Pour les technologies dont le prix est encore trop élevé pour que leur déploiement massif soit supportable par les budgets publics ou par les usagers, appuyer les efforts de R&D dans les cas où elles nécessitent des ruptures technologiques et, dans les cas où des bénéfices substantiels sont attendus d'économies d'échelle, mener des opérations de démonstration ou de déploiement limité. Le seuil au-delà duquel une technologie ne peut être considérée comme compétitive est à déterminer.
- ▶ Encourager le déploiement des énergies renouvelables dont le prix est proche de celui du marché en privilégiant, à compétitivité égale ou légèrement moindre, les solutions créatrices d'emplois industriels en France. Il serait également pertinent d'étudier des mesures incitant à la fabrication des équipements dans l'Union européenne. Il existe ainsi au Canada et en Italie des tarifs d'achat favorisant les installations photovoltaïques comportant une forte part de production locale (respectivement dans l'État de l'Ontario et dans l'Union européenne)⁽¹⁶⁾ : toutefois, de telles mesures peuvent donner lieu à controverse, l'Union européenne et le Japon ayant porté plainte auprès de l'OMC contre le programme de tarifs de rachat garantis (FIT)⁽¹⁷⁾ de l'Ontario.

PROPOSITION 3

Compte tenu des différences de prix entre les installations photovoltaïques au sol et en toiture, étendre le concept de bâtiment à énergie positive à un ensemble plus large, l'îlot ou le quartier, afin de bénéficier d'énergies locales à moindre coût.

Les toitures photovoltaïques résidentielles ou tertiaires présentent aujourd'hui un coût de revient de l'électricité plus élevé que les parcs photovoltaïques au sol. En l'absence de progrès technologiques significatifs sur celles-ci, leur déploiement massif dans la perspective de concevoir des bâtiments à énergie positive pourrait donc s'avérer particulièrement coûteux : ainsi semble-t-il souhaitable d'élargir le concept de bâtiment à énergie positive à une échelle spatiale plus grande : l'îlot ou le quartier, qui rendraient possible la production d'électricité à partir de centrales photovoltaïques au sol. Lorsque la disponibilité du foncier n'est pas suffisante pour produire de l'électricité photovoltaïque en quantité satisfaisante, on pourrait s'autoriser à bénéficier d'une production en provenance d'un rayon plus étendu. Cette extension du concept de bâtiment à énergie positive permet de surcroît de bénéficier, avec un meilleur

[16] L'Italie offre une prime supplémentaire de 10 % pour les installations photovoltaïques dont le coût de construction, à l'exclusion des coûts de main-d'œuvre, est composé à 60 % ou plus de produits fabriqués dans l'Union européenne.

[17] Pour être éligible à ce programme de tarifs d'achat garantis, les parcs éoliens de plus de 10 kW et les installations photovoltaïques entrant en exploitation en 2012 doivent comporter une part minimale (respectivement 50 % et 60 %) de biens et services provenant de l'Ontario.

rapport coût/efficacité, d'autres énergies disponibles localement comme la biomasse ou la géothermie, ou encore de moyens de gestion comme les réseaux de chaleur.

PROPOSITION 4

Investir dans les technologies transverses : les dispositifs de régulation et de gestion des systèmes (contrôle-commande) et en particulier du bâtiment (réseau domiciliaire) ; les nanotechnologies ; les techniques de mesure (métrologie) ; les TIC ; les matériaux.

Le rôle des technologies transverses est crucial, les progrès dans ces domaines étant souvent la condition et le moteur des évolutions dans les technologies spécifiques :

- ▶ Le contrôle-commande regroupe l'ensemble des dispositifs servant à la gestion et à la régulation d'un système et constitue, de ce fait, un élément nécessaire à l'optimisation du fonctionnement et à la protection des grandes infrastructures techniques. Il intervient de manière plus ou moins complexe dans de nombreux secteurs : la production et la distribution d'énergie (*smart grids*, nucléaire), le transport (outils de gestion du trafic aérien ou routier), les grandes installations industrielles, etc.
- ▶ Le concept de réseau domiciliaire apparaît comme une technologie de régulation clé dans le domaine du bâtiment en permettant la gestion commune de l'ensemble des services qu'il assure (production et stockage de l'énergie, services de télécommunication, santé à domicile, sécurité, etc.).
- ▶ Les nanotechnologies apparaissent comme des vecteurs d'innovation permettant de développer des produits hautement performants en utilisant des quantités très faibles de matières premières. Leurs nombreuses applications laissent augurer de véritables ruptures technologiques, par exemple dans le domaine des cellules photovoltaïques ou des matériaux super-isolants déjà évoqués plus haut.
- ▶ Les progrès en métrologie, qui recouvre l'ensemble des techniques et savoir-faire permettant d'effectuer des mesures et de garantir leur fiabilité, permettront une meilleure appréhension des enjeux sanitaires et environnementaux relatifs tant aux technologies matures qu'aux technologies émergentes : dans le bâtiment par exemple, pour améliorer la mesure des concentrations de polluants atmosphériques spécifiques à l'air intérieur, ou encore dans le domaine des nanotechnologies pour affiner la caractérisation (forme, propriétés physico-chimiques) des nanoparticules.

Certaines technologies transverses comme les matériaux innovants (en particulier les matériaux composites) ou les

technologies de l'information et de la communication n'ont pas fait l'objet de chapitres dédiés mais sont source de progrès décisifs, en particulier dans le transport (pour l'optimisation et la régulation du trafic) et dans le bâtiment (pour une meilleure gestion active de la régulation).

CONCLUSION



Le vaste panorama des évolutions technologiques nécessaires pour répondre au défi du développement durable et les champs prometteurs qu'il contient justifient le soutien public à accorder, même en périodes de tension budgétaire, à la recherche publique et privée ainsi qu'au développement de PME, acteurs essentiels de la transition de l'innovation de la recherche au marché.

La mise en place d'un signal économique sur le prix du carbone permet de plus de favoriser la mise au point des technologies permettant de lutter contre le changement climatique.

Toutefois, au-delà des crédits publics, le développement de ces innovations ne peut se faire sans l'assentiment de la population. Les progrès technologiques soulèvent une défiance manifeste de la part de la société. En sus des interrogations croissantes qu'ils suscitent sur les risques sanitaires, environnementaux, sociétaux, apparaissent également des critiques de plus en plus fortes concernant l'absence de transparence et la confiscation de l'expertise dans les processus de décision. Tout cela invite à revoir, en profondeur, les pratiques actuelles en matière de prise de décisions publiques et privées. L'innovation est, à tout point de vue, nécessaire, notamment en raison de ses retombées en termes de croissance économique : pour qu'elle puisse se réaliser, les enjeux sociétaux qui lui sont attachés doivent être pris en considération le plus en amont possible à travers des débats de société.

- ▶ **Mots clés :** technologies, énergie, transport, bâtiment, R&D, industrie, gaz à effet de serre.



Jean Bergougnoux, consultant, président d'honneur de la SNCF, directeur général honoraire d'EDF
Dominique Auverlot et Gaëlle Hossie, département Développement durable



La Note d'analyse n° 276 - août 2012 est une publication du Centre d'analyse stratégique

Directeur de la publication : Vincent Chriqui, directeur général

Directeur de la rédaction : Hervé Monange, directeur général adjoint

Secrétaires de rédaction : Delphine Gorges, Valérie Senné

Impression : Centre d'analyse stratégique

Dépôt légal : août 2012

N° ISSN : 1760-5733

Contact presse : Jean-Michel Rouillé, responsable de la communication
01 42 75 61 37 / 06 46 55 38 38
jean-michel.rouille@strategie.gouv.fr



Des technologies compétitives au service du développement durable

www.strategie.gouv.fr, rubrique publications

Retrouvez les dernières actualités du Centre d'analyse stratégique sur :

-  Internet : www.strategie.gouv.fr
-  Facebook : [centredanalysestrategique](https://www.facebook.com/centredanalysestrategique)
-  Twitter : [Strategie_Gouv](https://twitter.com/Strategie_Gouv)

Le Centre d'analyse stratégique est une institution d'expertise et d'aide à la décision placée auprès du Premier ministre. Il a pour mission d'éclairer le gouvernement dans la définition et la mise en œuvre de ses orientations stratégiques en matière économique, sociale, environnementale et technologique. Il préfigure, à la demande du Premier ministre, les principales réformes gouvernementales. Il mène par ailleurs, de sa propre initiative, des études et analyses dans le cadre d'un programme de travail annuel. Il s'appuie sur un comité d'orientation qui comprend onze membres, dont deux députés et deux sénateurs et un membre du Conseil économique, social et environnemental. Il travaille en réseau avec les principaux conseils d'expertise et de concertation placés auprès du Premier ministre : le Conseil d'analyse économique, le Conseil d'analyse de la société, le Conseil d'orientation pour l'emploi, le Conseil d'orientation des retraites, le Haut Conseil à l'intégration.

www.strategie.gouv.fr