



Stratégie nationale de recherche et d'innovation 2009

Rapport du groupe de travail
Énergie durable

RESUME

Les progrès accomplis dans le domaine des économies d'énergie ne suffiront pas à contrebalancer l'augmentation des besoins dus entre autres à la croissance de la population mondiale. Selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie, la demande mondiale d'énergie primaire devrait croître de presque 60 % d'ici 2030 correspondant, à technologies constantes, à une hausse du même ordre de grandeur des gaz à effet de serre. Répondre à la croissance de la demande énergétique passe donc par le recours à un bouquet énergétique diversifié et axé sur les énergies durables, ces dernières étant définies comme les énergies renouvelables, ou partiellement recyclables, et consommant le moins possible de ressources.

La stratégie nationale de recherche et d'innovation dans ce domaine reprend, notamment, les conclusions de la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique et plus récemment les travaux menés par le *Grenelle de l'environnement*, le tout s'appuyant sur le Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques (Plan Set) et les initiatives industrielles européennes dédiées. A horizon 2020, les objectifs poursuivis sont : une réduction de 20% des émissions de gaz à effet de serre, le passage à 20% de la part des énergies renouvelables, et une amélioration de 20% de l'efficacité énergétique.

Les axes de recherche dans le domaine de l'énergie durable doivent se baser sur l'apport des technologies «incrémentales» à court terme, sur la mise en œuvre de technologies de «discontinuité» à moyen terme, sur l'utilisation de technologies de rupture à long terme (à l'horizon 2050).

Objectif 1 : promouvoir le mix énergétique et son accompagnement social et économique

- *affirmer les priorités stratégiques de recherche sur les énergies solaire, la capture et le stockage du CO₂, les biocarburants de seconde génération, le nucléaire de 3^{ème} et de 4^{ème} génération.* Elles constituent une large palette d'axes complémentaires devant déboucher à des termes distincts. Des actions transversales sont également requises sur le stockage de l'énergie (batteries), l'électronique de puissance, les réseaux intelligents et les matériaux. L'apport des mathématiques, du calcul intensif et du numérique est essentiel pour évaluer les modèles technologiques et optimiser leur fonctionnement.
- *promouvoir une recherche socio-économique sur l'énergie à même d'éclairer les enjeux des politiques énergétiques et de recherche.* Le développement de nouvelles options énergétiques ne saurait s'effectuer sans une articulation étroite avec leur insertion dans la société. La conception même de ces technologies doit en effet s'effectuer avec le souci de prendre en compte l'environnement et le comportement des consommateurs, déterminants pour l'acceptabilité et l'adoption des innovations proposées. Les sciences humaines et sociales peuvent contribuer au domaine de l'énergie, notamment autour de trois grands axes : la maîtrise des consommations et l'organisation de l'offre, la fiabilité de la production et de la distribution ; la prise en compte des contraintes environnementales.

Objectif 2 : améliorer l'efficacité des opérateurs de recherche et des processus d'innovation

- *Systématiser la création de centres d'intégration des technologies répondant au mix énergétique recherché :*
 - autour du démonstrateur de recherche retenu par l'ADEME pour le captage/stockage du CO₂ ;
 - à Chambéry avec le centre INES pour l'énergie solaire ;
 - autour des démonstrateurs retenus par l'ADEME pour les biocarburants de 2^{ème} génération ;

- à Versailles-Satory pour les transports innovants à faible émission de gaz à effet de serre ;
 - identification en cours pour le domaine du bâtiment ;
 - à Grenoble pour l'hydrogène, les piles à combustible et le stockage de l'énergie ;
 - à Toulouse pour l'électronique de puissance (transport, habitat, etc.) ;
 - autour du pôle Axelera (Rhône-Alpes) pour Matériaux innovants et Procédés propres ;
 - à Cadarache et Marcoule pour le nucléaire de fission et de fusion avec le support amont du pôle de Saclay.
- *Renforcer la formation des professionnels des nouvelles technologies de l'énergie.* Un fort besoin de formation existe pour développer les compétences nécessaires au développement des technologies et des opportunités de marché, fondées sur les nouvelles technologies de l'énergie mais aussi sur le nucléaire. Les formations des professionnels amenés à installer les dispositifs reposant sur les nouvelles énergies auprès du grand public sont également à prévoir.

Objectif 3 : tabler sur des actions européennes et concertées

- *Prendre en compte le rôle des démonstrateurs technologiques dans la mise en œuvre du Plan-SET.* Au niveau européen, un certain nombre de programmes de recherche et d'innovation sur l'énergie ont déjà été développés en commun (la fusion nucléaire, l'hydrogène et les piles à combustible). Six nouvelles initiatives industrielles sont identifiées prioritaires dans le cadre du plan SET et appellent à une coordination européenne : les bioénergies, le captage et stockage du CO₂, la fission nucléaire, les réseaux intelligents, l'éolien et le solaire.

La disponibilité de technologies de rupture permettant de remplir les objectifs et leur diffusion envisagée dans les parcs (logements, véhicules, procédés) nécessitent de valider un certain nombre d'options, en amont de l'ouverture des marchés. Certaines de ces options ne trouveront de marché qu'à partir de 2020 ou au-delà. Cet horizon est lointain au regard des stratégies des entreprises et il est nécessaire d'expérimenter, dès à présent, des démonstrateurs de recherche. Pour tenir compte de la probable nécessité de passer par plusieurs étapes avant d'atteindre les objectifs, des projets sur les filières ou options technologiques suivantes sont envisagés :

- les systèmes intégrés optimisant l'utilisation de nouvelles technologies de l'énergie au niveau de la ville (*smart towns*) ;
- des sites d'essais et de démonstration (dont énergies marines) ;
- les démonstrateurs pour les alternatives innovantes de réacteurs à fission de quatrième génération.

Ces démonstrateurs de recherche préfigurent les opérations de démonstration à l'échelle industrielle d'ores et déjà identifiées au niveau européen dans certaines filières (captage et stockage du CO₂, biocarburants de seconde génération, etc.) et nécessiteront un cadre juridique adapté (propriété intellectuelle, valorisation de la production, gouvernance du projet).

- *Lancer la réalisation de feuilles de route technologiques partagées sur les différentes options de recherche.* Pour chaque filière technologique concernée, il est nécessaire de systématiser l'élaboration de feuilles de route associant l'ensemble des différents acteurs (organismes publics, industriels, utilisateurs potentiels, etc.). Ces agendas partagés constituent un instrument de pilotage indispensable. Ils permettent de définir les étapes et les objectifs du soutien public à la recherche (faisabilité scientifique et technologique, démonstration dans les conditions réelles de fonctionnement).

SOMMAIRE

1	PÉRIMETRE ET ENJEUX	2
1.1	UN CADRE LEGISLATIF ET REGLEMENTAIRE NATIONAL ET EUROPEEN	2
1.1.1	<i>Au niveau national</i>	2
1.1.2	<i>Un cadre européen qui se renforce</i>	2
1.2	LES AXES DE REFLEXION	3
2	ANALYSE DE LA SITUATION DE LA FRANCE	3
2.1	L'ENGAGEMENT BUDGETAIRE.....	3
2.2	ANALYSE SYNTHETIQUE DE LA SITUATION FRANÇAISE	4
2.3	VERS UNE PROGRAMMATION COMMUNE DE LA RECHERCHE : LE PLAN SET	5
3	LA PROBLÉMATIQUE STRATÉGIQUE	6
3.1	DEVELOPPER L'ENERGIE SOLAIRE	6
3.2	POURSUIVRE LA RECHERCHE SUR LES BIOCARBURANTS DE 2 ^{EME} ET 3 ^{EME} GENERATIONS ET LA METHANISATION	7
3.3	AMELIORER LA DURABILITE DES ENERGIES FOSSILES, NOTAMMENT PAR LE CAPTAGE ET LE STOCKAGE DU CO ₂	8
3.4	SOBRIETE/EFFICACITE ENERGETIQUE DANS LES SECTEURS GRANDS CONSOMMATEURS D'ENERGIE	9
3.5	AUTRES ENERGIES RENOUVELABLES : VEILLE TECHNOLOGIQUE ET EFFORTS CIBLES	12
3.6	DEVELOPPER LE STOCKAGE, LA CONVERSION ET LES TECHNOLOGIES DE GESTION DE L'ENERGIE.....	13
3.7	NUCLEAIRE : LES REACTEURS DE FISSION ET DE FUSION, LES DECHETS RADIOACTIFS.....	14
3.8	AUGMENTER L'EFFICACITE DU SYSTEME DE RECHERCHE ET D'INNOVATION, TANT A L'EGARD DE LA RECHERCHE AMONT QUE DES ENTREPRISES	15

Énergie durable

1 PÉRIMETRE ET ENJEUX

La population mondiale pourrait passer à 10 milliards d'habitants en 2050 et les progrès accomplis dans le domaine des économies d'énergie ne suffiront pas à contrebalancer l'augmentation des besoins. Selon les prévisions de l'Agence Internationale de l'Énergie, la demande d'énergie primaire devrait croître de presque 60 % d'ici 2030 correspondant, à technologies constantes, à une hausse du même ordre de grandeur des gaz à effet de serre. La nécessité de lutter contre les effets du changement climatique demande de trouver des solutions compatibles avec un développement durable. Répondre à la croissance de la demande énergétique passe donc par le recours à un bouquet énergétique diversifié et axé sur les énergies durables, ces dernières étant définies comme les énergies renouvelables, ou partiellement recyclables, consommant le moins possible de ressources.

1.1 Un cadre législatif et règlementaire national et européen

1.1.1 Au niveau national

La loi de programme du 13 juillet 2005 (dite Loi POPE programme orientations de la politique énergétique) a fixé les orientations de l'ensemble de la politique énergétique au niveau national. Des objectifs chiffrés ont été définis afin de mettre l'accent sur la maîtrise de la demande et la promotion de nouvelles énergies plus respectueuses de l'environnement :

- division par quatre des émissions de CO₂ d'ici 2050 ;
- baisse moyenne de l'intensité énergétique finale de 2 % par an à partir de 2015, et de 2,5 % à partir de 2030 ;
- production de 10 % des besoins énergétiques à partir de sources d'énergies renouvelables d'ici 2010 ;
- passage à 7 % en 2010 et à 10 % en 2015 de la part des biocarburants et des autres carburants renouvelables dans la teneur énergétique de la quantité totale d'essence et de gazole mise en vente sur le marché national à des fins de transport.

Le Grenelle de l'environnement a amplifié ces objectifs en prévoyant de porter à au moins 20 %, en 2020, la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale. L'Assemblée nationale a porté l'objectif à 23 % lors de l'examen de la loi de programme relatif à la mise en œuvre du Grenelle.

1.1.2 Un cadre européen qui se renforce

Parallèlement, des objectifs ont été fixés au niveau européen :

- réduction de 20 %, d'ici 2020, de la consommation énergétique par rapport à sa tendance estimée ;
- passage à 20 %, d'ici 2020, de la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale ;
- passage à au moins 10 %, d'ici 2020, de la part des biocarburants dans la consommation totale d'essence et de diesel, à condition que des biocarburants de deuxième génération, provenant de cultures non alimentaires, soient disponibles sur le marché ;
- réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 20 % d'ici 2020 par rapport à 1990 voire 30% en cas d'accord international, de 60 à 80 % d'ici 2050 ;

- réalisation d'un marché intérieur de l'énergie apportant des bénéfices concrets aux particuliers et aux entreprises ;
- renforcement de la synergie de la politique énergétique de l'Union européenne (UE) avec d'autres politiques, notamment en matière d'agriculture et de commerce ;
- intensification de la coopération internationale ;

Les objectifs nationaux découlant du Grenelle de l'environnement et de la loi POPE, ambitieux, s'insèrent sans difficulté dans le cadre européen.

Un Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques (Plan SET), a été adopté par le Conseil de l'Union européenne début 2008. Dans le cadre de la présidence française du Conseil de l'Union européenne, la conférence *Vers une énergie bas carbone* a réuni, pour la première fois, les grands acteurs européens de la recherche et de l'innovation dans le domaine de l'énergie. A cette occasion, **l'Alliance des instituts de recherches européens de l'énergie** a été officiellement lancée et a établi la liste des thèmes de recherche pouvant être l'objet d'une programmation commune.

1.2 Les axes de réflexion

La stratégie nationale de recherche et d'innovation dans le domaine de l'énergie durable doit donc reprendre, notamment, les conclusions de la loi POPE, les travaux menés par le *Grenelle de l'environnement*, les objectifs du « paquet européen » énergie-climat adopté en décembre 2008, le PLAN SET et les initiatives industrielles européennes dédiées.

La réflexion est conduite autour des objectifs suivants :

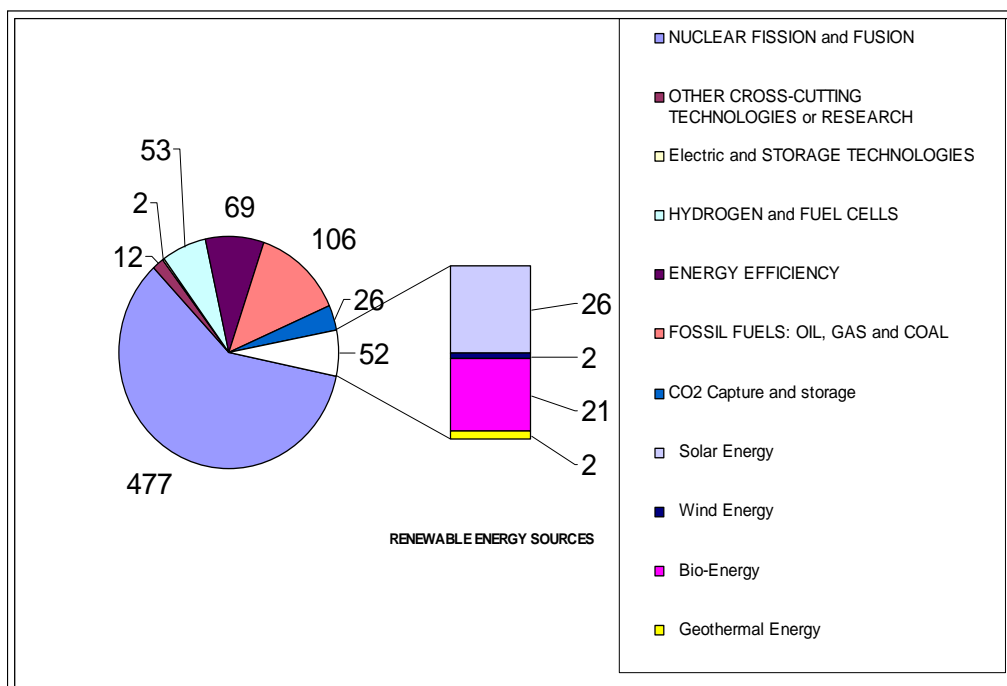
- développer les technologies adaptées aux besoins locaux et régionaux en énergie, notamment à partir de sources renouvelables (comme l'énergie solaire, les biocarburants de seconde génération, le stockage de l'énergie et l'électronique de puissance, la gestion de l'énergie, etc.) ;
- amplifier les innovations en matière de systèmes énergétiques des bâtiments, les démonstrateurs de bâtiments à énergie positive, le développement d'enveloppes intelligentes et de nouveaux matériaux, avec un effort particulier sur le parc installé ;
- innover pour des transports à plus grande efficacité énergétique, véhicules électriques, hybrides ou plug-in, développement de nouvelles architectures d'avions, intégration de nouveaux carburants et allègement des équipements ;
- améliorer significativement l'utilisation des ressources pour le nucléaire.

2 ANALYSE DE LA SITUATION DE LA FRANCE

2.1 L'engagement budgétaire

Les fonds publics nationaux consacrés à la recherche dans le domaine de l'énergie se classent en deux catégories :

- Les financements de base des grands organismes publics de recherche et des laboratoires universitaires.
- Les fonds nationaux incitatifs mobilisant les acteurs publics (organismes et universités) et la recherche privée dans le cadre du nouveau dispositif d'aide à la recherche.



Répartition en M€2006 des 800M€(euros constants) de la dépense publique en recherche sur l'énergie
ref : DGEMP/service de l'observation et des statistiques (SOeS), MEEDDAT/CGDD.

2.2 Analyse synthétique de la situation française

Le tableau synthétique suivant présente un bilan du positionnement des différentes filières énergétiques et montre l'étendue des domaines de recherche sur lesquels la France doit s'investir.

Filière	Filière industrielle	Position : scientifique / technologique	Croissance du marché	Part de marché	Intérêt stratégique pour la France	Commentaires
Eolien	Faible	Faible / Faible	Très forte	Faible	Faible mais moyen pour l' <i>offshore</i>	1 seul constructeur de petite éolienne, à nuancer pour l' <i>offshore</i>
Solaire photovoltaïque	Moyenne, perte de vitesse / concurrence	Forte/ Forte	Très forte	Moyenne, perte de vitesse / concurrence	Fort	Filière Silicium en cours de reconstruction Appuis publics nécessaires
Solaire Thermique	Moyenne, perte de vitesse / concurrence	Basse Température faible ; Haute Température forte / Moyenne	Très forte	Moyenne, perte de vitesse / concurrence	Fort	Filière industrielle à conforter
Biocarburants	Forte	Voie humide : forte ; sèche : moyenne / Moyenne	Forte	Forte	Fort	
Biogaz	Moyenne	Faible / Moyenne	Moyenne	Forte	Fort	
Production H2	Forte	Forte / Forte	Forte	Moyenne	Fort	

Pile à combustible	Moyenne	Forte / Faible	Faible	Moyenne	Moyen	
Energie Marine	Faible	Faible / Faible	Moyenne	Faible	Faible	A nuancer pour l'Outre-mer
Stockage de l'énergie	Faible	Forte / Moyenne	Très forte	Faible	Fort	Facteur limitant du développement des énergies renouvelables et des véhicules électriques
Bois-énergie	Forte	Faible / Faible	Forte	Forte	Fort	Chaîne de la valeur à développer. Approvisionnement à résoudre
Géothermie	Moyenne	Moyenne / Moyenne	Forte	Forte	Fort	Ressource difficile à appréhender
Captage stockage CO₂	En cours de structuration	Moyenne / Forte	Forte	En cours de structuration	Fort	Le déploiement dépendra des mécanismes incitatifs
Nucléaire Fission	Forte	Forte / Forte	Forte	Forte	Fort	Prise en compte de la durabilité dans le programme Génération 3 comme Génération 4
Nucléaire Fusion	sans objet	Forte / Forte	sans objet	sans objet	Fort	

2.3 Vers une programmation commune de la recherche : le Plan SET

Le Plan SET établit un programme d'action au niveau européen :

- à l'horizon 2020, réduire le coût des technologies à faible intensité carbonique existantes et placer les entreprises de l'UE en position de pointe dans le secteur ;
- à l'horizon 2050, permettre la mise au point de nouvelles générations de technologies.

Au-delà de l'initiative technologique conjointe (JTI) piles à combustible et hydrogène, six nouvelles initiatives industrielles européennes traduisent concrètement les sujets sur lesquels une action commune est proposée.

1. Initiative européenne pour l'énergie éolienne : axée sur la validation et la démonstration de grandes turbines et de grands systèmes (pour les applications sur terre et en mer).
2. Initiative européenne pour l'énergie solaire : axée sur la démonstration à grande échelle dans le domaine de l'électricité photovoltaïque et de l'énergie solaire concentrée.
3. Initiative européenne pour les bioénergies : axée sur les biocarburants de la prochaine génération dans le cadre d'une stratégie globale pour l'utilisation de la bioénergie.
4. Initiative européenne pour le piégeage, le transport et le stockage du CO₂ : axée sur l'ensemble des besoins des systèmes, y compris l'efficacité, la sécurité et l'acceptation publique, en vue de démontrer la viabilité, à l'échelle industrielle, des centrales à combustibles fossiles à taux d'émission zéro.

5. Initiative européenne pour le réseau électrique : axée sur le développement du système électrique intelligent, y compris la problématique du stockage et la création d'un Centre européen pour la mise en œuvre d'un programme de recherche pour le réseau européen de transport.
6. Initiative pour la fission nucléaire durable : axée sur le développement des technologies de la quatrième génération (Gen-IV) et extension des applications de l'énergie nucléaire (désalinisation, chaleur industrielle, production d'hydrogène).

3 LA PROBLÉMATIQUE STRATÉGIQUE

La stratégie nationale de recherche dans le domaine de l'énergie s'appuie sur les trois volets de la politique énergétique française et européenne - compétitivité économique, sécurité d'approvisionnement, protection de l'environnement - et le constat que répondre à la demande croissante d'énergie dans le respect de nos engagements environnementaux passera par des solutions nécessairement diversifiées, l'ensemble des technologies « durables » devant être mises à contribution.

Afin de prendre en compte les éléments clés de prise de décision et notamment les contraintes d'acceptabilité sociale, d'usage et de comportement, d'économie et de financement, d'organisation et de filières professionnelles, etc, il est nécessaire de décliner les recherches dans le domaine des sciences humaines et sociales.

3.1 Développer l'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque constitue le domaine, par excellence, où la recherche peut conduire à des ruptures technologiques qui changeront une donne industrielle qui n'est pas encore totalement définie. En France, les conditions existent encore, probablement, pour l'établissement d'une filière industrielle photovoltaïque, en particulier avec l'apport des nanotechnologies.

- **Prévoir un programme de R&D sur l'utilisation de silicium métallurgique :**

Sur les technologies du silicium cristallin et multi-cristallin qui dominent actuellement le marché et qui continueront à se développer pendant encore un certain temps, l'effort de recherche et développement doit porter sur l'ensemble de la chaîne. L'enjeu essentiel est la baisse de coût du produit final en travaillant à la fois sur des technologies plus performantes, sur chaque maillon de la chaîne, et sur leur intégration dans un processus industriel global, mais également sur la fourniture d'un silicium spécifique à un coût plus bas.

- **Permettre au solaire photovoltaïque de gagner en compétitivité grâce à l'émergence de technologies de couches minces qui constituent la concrétisation d'une rupture technologique.**
- **Soutenir la recherche sur des matériaux organiques susceptibles de remplacer le silicium, matériau coûteux, dont la fabrication est énergétivore.**

Cet axe de recherche mobilise un ensemble de pays dont les États-Unis, l'Allemagne, le Benelux et la France. Les polymères actuellement mis au point ont des rendements de conversion très faibles (entre 3 % et 5 %), et des durées de vie limitées dans le temps (quelques minutes) alors qu'il faudrait atteindre plusieurs milliers d'heures (la cible sur le court terme porte donc sur les produits portables de faible durée de vie).

- **Améliorer, sur le court terme, les dispositifs existants en matière de solaire thermique dans deux directions : abaissement du coût et développement de systèmes combinés chauffe-eau/chauffage. Le développement d'une filière solaire à concentration mérite d'être encouragé.**

Ces technologies se développeront dans des pays bénéficiant à la fois d'un fort ensoleillement et de surfaces au sol accessibles. Ce sont donc des marchés potentiels pour l'exportation qui peuvent se développer. La France possède en effet des entreprises pouvant proposer des éléments technologiques (miroirs, tubes, etc.) et des compétences.

- **Mettre au point des matériaux pouvant servir de matériaux de base pour le bâtiment et présentant, de surcroît, une fonctionnalité photovoltaïque.**

Alors que les panneaux solaires utilisés pour la collecte de la chaleur sont aujourd'hui purement et simplement accrochés sur les toits et sur les murs, on envisage de les intégrer aux bâtiments en en faisant des éléments de leur structure. Une deuxième étape consistera à mettre au point de nouveaux matériaux collecteurs d'électricité, comme des vitrages recouverts d'une fine couche de produits photovoltaïques ou des matériaux de revêtement de façades, afin de collecter l'électricité générée par la lumière frappant la totalité de l'enveloppe des bâtiments.

3.2 Poursuivre la recherche sur les biocarburants de 2^{ème} et 3^{ème} générations et la méthanisation

- **La France doit jouer un rôle moteur dans l'utilisation de la biomasse**

En effet, des enjeux non énergétiques sont liés au développement des biotechnologies et à la valorisation des forêts et des ressources agricoles. L'exploitation agricole de la biomasse ouvre des opportunités d'innovation et de reconversion particulièrement importantes pour le pays de haute technicité dans le domaine qu'est la France. Toutefois, le fait que le recours à cette forme d'énergie demeure fondamentalement contraint par la disponibilité des surfaces exploitables doit être pris en compte. Seule la biomasse dite de 3^{ème} génération, notamment la production de micro-algues riches en huile, ouvre une perspective différente par une aquaculture qui reste à créer. La valorisation des déchets agricoles et animaux doit être considérée comme essentielle, à la fois pour la limitation des émissions de méthane et pour leur valorisation énergétique. La valorisation énergétique et la production d'électricité à partir de la combustion de ce méthane d'origine organique doivent être conçues comme une véritable nouvelle filière.

- **A court terme, l'amélioration des filières industrielles de biocarburants selon les axes principaux suivants :**
 - Une meilleure adéquation des produits d'origine végétale aux orientations du marché français et européen des carburants (persistance d'une augmentation continue de la demande en gazole) en les rendant chimiquement compatibles avec les exigences de la demande.
 - L'organisation et la structuration des filières d'approvisionnement : garantie d'approvisionnement, conditionnement des produits intermédiaires et logistique.
 - La poursuite des travaux en socio-économie sur les conflits d'usage et d'espace : compétition, biomatériaux, agriculture alimentaire et non-alimentaire, aménagement du territoire, tourisme, etc.
- **A moyen et long terme, tirer le meilleur profit des surfaces terrestres disponibles en :**
 - Maximisant la biomasse utilisable par hectare dans les filières d'agro-foresterie (rationalisation des exploitations forestières, cultures et boisement à rotation rapide, sélection végétale, etc.).
 - Exploitant la totalité de la plante et notamment ses constituants lignocellulosiques dont la valorisation énergétique s'effectue aujourd'hui exclusivement sous forme de combustible direct et non de carburants.

- **La valorisation de la plante entière est envisagée selon deux familles de procédés qui feront l'objet, à court terme, de la réalisation de démonstrateurs**

- La voie thermique par gazéification susceptible de s'enchaîner à une opération de liquéfaction par synthèse de type Fischer-Tropsch sous réserve de maîtriser les étapes de purification, voire même de produire de l'hydrogène.
- La voie biologique à la fois plus exploratoire mais offrant potentiellement une plus grande diversité de procédés et de produits.

- **Le développement de l'aquaculture des micro-algues**

Le développement international, en particulier aux Etats-Unis, au Japon, en Israël, en Espagne, de la culture des micro-algues riches en huile ouvre des perspectives nouvelles, tant en terme de rendement de conversion huile / algues (jusqu'à 70 %) qu'en terme d'efficacité photosynthétique et d'empreinte territoriale. Ces développements, à l'interface de différentes disciplines (biologie, connaissance des substrats, conception de procédés, aquaculture), nécessitent une coordination des compétences de divers laboratoires et une interface avec l'industrie française de la chimie verte qui a déjà identifié cette nouvelle voie. Cette troisième génération, prometteuse en termes de rendements mais dont la faisabilité économique reste à démontrer, demande une fédération des efforts de recherche et d'innovation autour d'un projet commun.

- **Le développement de la filière de méthanisation**

La méthanisation des lisiers, des déchets végétaux agricoles mais également de co-produits en excès comme le lactosérum ou la glycérine, doit être conçue avec une vision d'ensemble de la production de ces différents déchets ou co-produits à l'échelle régionale. Une nouvelle vision technique est nécessaire au développement de digesteurs plus efficaces énergétiquement et intégrant la séparation du méthane de gaz polluants. Il faut par ailleurs remplacer le brûlage direct actuel (torchage) par une cogénération efficace. La production d'électricité décentralisée associée à cette méthanisation semble être la voie la mieux adaptée pour la France. Ce sujet interdisciplinaire associe des compétences sur la fermentation, la séparation des gaz et la conception de procédés innovants.

3.3 Améliorer la durabilité des énergies fossiles, notamment par le captage et le stockage du CO₂

Les énergies fossiles devant continuer à représenter une part conséquente de la fourniture énergétique, les recherches doivent porter à la fois sur l'approvisionnement (réserves exploitables) et sur une utilisation compatible avec les objectifs environnementaux.

- **Développer, à travers des démonstrateurs, l'ensemble des technologies nécessaires, en particulier pour le stockage sûr dans les aquifères**

Afin de pouvoir limiter les effets du changement climatique, la France ne peut être absente du développement des technologies de captage, de transport et de stockage géologique du CO₂. Les applications, en France, sont limitées par la nature de notre économie, mais il s'agit d'un marché potentiel pour l'exportation (comprenant l'exploitation de centrales à l'étranger) où les entreprises françaises auront un rôle non négligeable à jouer. Par ailleurs cette option peut constituer un atout pour le maintien sur le territoire national des entreprises industrielles fortement émettrices de CO₂ (sidérurgie, raffinage...).

Sur le long terme, une voie de recherche potentiellement intéressante est la valorisation de CO₂ en composés utiles (composés chimiques, carburants, gaz de synthèse). En raison du bas niveau d'énergie de la molécule de CO₂, cette transformation requiert une énergie de haut niveau (électricité ou haute température) dont la production n'est pas génératrice de gaz à effet de serre. Il convient

d'encourager les travaux visant à améliorer les rendements énergétiques des voies envisagées, à évaluer leur bilan GES et à examiner s'ils peuvent déboucher sur des procédés économiquement viables.

3.4 Sobriété/efficacité énergétique dans les secteurs grands consommateurs d'énergie

En parallèle avec la décarbonisation de la production d'énergie, que ce soit par le nucléaire, le photovoltaïque ou d'autres énergies renouvelables, il est indispensable pour la durabilité de minimiser la consommation d'énergie à service égal. Que ce soit pour le bâtiment et les procédés industriels ou agricoles, la sobriété et l'efficacité énergétique sont à la base du découplage entre croissance économique et consommation énergétique. Dans les secteurs où l'énergie est une préoccupation majeure (transport, habitat, ...), des techniques d'optimisation visent à réduire la consommation énergétique via des algorithmes performants (Régulation air/essence dans les moteurs thermique, régulation de flux dans les machines électriques,...). La distribution d'électricité a une problématique analogue.

Le secteur des transports

La maîtrise des émissions de polluants et de gaz à effet de serre dans le transport demeure un objectif important du Grenelle de l'environnement. La réduction de la consommation est donc un axe d'amélioration capital. Qu'il s'agisse du transport terrestre ou aérien, il existe des programmes structurants français (Predit¹, Acore²) qui rassemblent acteurs et décideurs dans un cadre favorable à l'innovation. En complément de ces deux programmes, les propositions qui suivent visent à mettre en évidence des efforts de recherche précis en identifiant le besoin de plateformes communes de recherche et développement, mais également un besoin de partenariat avec les industriels sur certaines filières.

- **Les procédés efficaces de conversion** des fractions lourdes en carburants et des procédés de production de carburants liquides à partir de gaz naturel et de charbon **et l'introduction, à moyen terme, des carburants de substitution** à base de biomasse qui ne conduisent pas à des émissions de CO₂ fossile.
- **Les projets entrant dans la logique des démonstrateurs** : la conception et la démonstration de véhicules spécifiquement urbains hybrides et électriques, tant pour les véhicules particuliers que pour les véhicules utilitaires légers. La conception de véhicules spécifiquement électriques permettant l'optimisation des différentes fonctionnalités (recharge, stockage, motorisation, etc.), les auxiliaires (par exemple, chauffage et climatisation de l'habitacle), l'éventuelle interchangeabilité des batteries, etc.
- **Les projets pouvant être mis en œuvre dans le cadre de plateformes technologiques partagées portées, par exemple, par les pôles de compétitivité** : les concepts de motorisation électrique en rupture (comme, par exemple, le moteur-roue) ; les batteries et super condensateurs, en visant l'accroissement de l'autonomie mais également la fiabilité, la réduction des coûts, la durabilité ; les composants électroniques de puissance et ceux des chaînes de traction hybrides et électriques, notamment pour permettre d'optimiser des options d'hybridation

¹ Programme de recherche et d'innovation sur les transports terrestres.

² *Advisory Council for Aeronautics Research*, programme Européen.

de plus en plus complètes. Les concepts de véhicules ultralégers (à 2, 3 ou 4 roues), dédiés à des besoins de mobilité très divers aussi bien en termes de distance et de vitesse que de charge transportée, constituent une voie radicale dans la diminution des consommations : il s'agit de viser des émissions de CO₂ inférieures à 60 g/km. Ces véhicules sont aussi utiles pour explorer les nouvelles solutions de mobilités orientées par l'usage et non par la propriété du véhicule. Pour les bus et véhicules utilitaires, l'hybridation peut permettre de diminuer fortement les émissions de CO₂ en usage urbain.

- **Les technologies innovantes pour le transport ferroviaire et les systèmes de gestion du trafic** : outre les trains et locomotives hybrides, il faut s'intéresser aux chaînes de traction innovantes faisant appel à de nouveaux types de moteurs de traction, nouveaux matériaux semi-conducteurs pour l'électronique de puissance, nouveaux concepts de transformateurs moyenne fréquence, meilleure récupération de l'énergie de freinage que ce soit à bord (système de stockage d'énergie) ou en sous-stations, développement de l'utilisation de nouveaux matériaux contribuant à l'allègement des structures, nouvelles technologies d'auxiliaires permettant de réduire considérablement leur consommation, système de gestion du trafic prenant en compte la dimension énergétique. La sécurité des logiciels complexes et l'usage des technologies de l'information et de la communication pour mieux répondre aux besoins d'accroissement de la capacité de l'infrastructure ferroviaire existante et offrir les services à bord de haut niveau attendus par les voyageurs (cf. : défi du numérique).
- **La question de l'optimisation de l'usage des infrastructures de transport est centrale.** La congestion conduit au gaspillage de l'énergie, et ne permet pas d'utiliser les véhicules dans leurs meilleures conditions de performance énergétique. On observera en outre que cette question de l'optimisation est également centrale dans les problématiques de sécurité (routière, ferroviaire, aérienne). Il est donc nécessaire d'intensifier les investigations sur les interactions entre la nature des véhicules de demain (véhicule hybride, électrique, véhicule hybride urbain) et l'organisation des systèmes de transport, au sein d'un même mode et entre les différents modes (développement de voies dédiées, tarification différenciée des infrastructures). Ainsi, l'émergence de technologies de véhicules spécifiques peut se combiner avec les nouvelles potentialités apportées par les technologies de l'information et de la communication (géolocalisation, information multimodale) et doit être accompagnée par les acteurs en charge de l'organisation des transports (collectivités, autorité organisatrice de transport urbain) et/ou des acteurs économiques.
- **Transport aérien : diminution de la consommation d'énergie.** Même si plusieurs thématiques de recherche sont communes à l'ensemble des modes de transport, le transport aérien doit être traité de façon spécifique. D'ici à 2020, les objectifs de réduction des émissions de CO₂ sont de 50 %, ceux de réduction des émissions de NO_x de 80 % et ceux de limitation du bruit de 50 %.

Sur le court terme, il s'agit de travailler sur de nouvelles architectures d'avions de transport avec des configurations motrices innovantes, des allègements des structures et des équipements. De nouveaux carburants intégrant des composants d'origine non fossile doivent être développés. L'efficacité de la *supply chain* doit être améliorée et les équipementiers doivent, en particulier, être encouragés à favoriser l'émergence de solutions novatrices qui permettent de réduire la masse des structures et des équipements et leur consommation énergétique, ou encore de développer des fonctions d'optimisation de l'énergie à bord ou la réduction de l'usage des moteurs au sol. Ces axes comprennent les développements de nouveaux concepts d'architectures mais également de développements dans le domaine des matériaux et nanotechnologies.

Sur le plus long terme, des études de configurations optimales (ailes volantes) et moteurs à détonation pulsée doivent être encouragées. La juxtaposition des programmes existants doit permettre la mise en service, dès 2017, d'une famille d'avions bénéficiant de ruptures technologiques.

Le secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment est, après celui des transports, la deuxième cible identifiée dans le « Plan Climat » de lutte contre le gaspillage énergétique et l'effet de serre. Il représente 46% de la consommation finale d'énergie et 25% des émissions de gaz à effet de serre. Cette consommation se répartit pour environ 2/3 pour le résidentiel et 1/3 pour le secteur tertiaire. A l'horizon 2020, l'objectif est de réduire les consommations énergétiques des bâtiments neufs et des bâtiments existants de 40% par rapport aux consommations respectives de ces parcs. A l'horizon 2050, c'est le bâtiment à énergie positive qui est visé.

- **Intégration en sous-ensembles fonctionnels des briques technologiques pour le bâtiment : élaborer des solutions diversifiées, mais standardisées**, adaptées à la forte hétérogénéité du parc de bâtiments existants, pour pouvoir proposer un ensemble de solutions globales de réhabilitation thermique, valable sur des sous-ensembles homogènes de bâtiments (« package » haussmannien, « package » établissement scolaire, « package » immeuble d'habitat collectif).
- **La préfiguration des bâtiments neufs de demain** : permettre, à l'horizon 2015 – 2020, la construction de bâtiments de tous types consommant pour le chauffage, le confort d'été, la production d'eau chaude sanitaire, le renouvellement d'air et l'éclairage, moins de 60 % de la consommation moyenne constatée actuellement pour les bâtiments performants. **Travailler sur l'enveloppe et les ambiances intérieures** : isolation thermique à ultra haute performance, renouvellement d'air par des systèmes double flux intégrant des moyens de chauffage et de rafraîchissement à très faible consommation, de l'ordre de 10 kW/m².an, le développement de façades passives ou actives à simple ou double peau, de murs solaires intégrant des matériaux à changement de phase et/ou des systèmes de ventilation. **Travailler sur les équipements et systèmes énergétiques qui doivent se miniaturiser, intégrer les énergies renouvelables et divers moyens de stockage énergétique** dans le cadre d'une conception globale bioclimatique, ce qui suppose le développement d'outils d'ingénierie concourante adaptée aux architectes et aux bureaux d'études techniques.
- **Validation des innovations et opérations de démonstration de bâtiments à énergie positive** : l'objectif de R&D poursuivi est de construire et de rénover, dès que possible, une part importante des bâtiments pouvant fournir plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Une part significative des bâtiments réhabilités devra pouvoir bénéficier des méthodes et des techniques mises au point. Pour les bâtiments neufs, la démarche visera la mise au point de « *concept buildings* » et de bâtiments démonstrateurs en trois étapes : définition d'ambitieux programmes formulés en termes d'exigences à partir de contraintes à satisfaire, utilisation de systèmes de simulation permettant de tester ces différentes voies d'approche, instrumentation de bâtiments démonstrateurs mettant en œuvre les solutions testées dans les projets virtuels et retour vers la conception des leçons tirées des bâtiments démonstrateurs.
- **Créer les formations supérieures adaptées aux métiers émergents** : la France manque de formations vers les professions techniques, techniciens d'utilisation, installation de matériels, optimisation qui requièrent de nouvelles compétences professionnelles. La question de la qualité des entreprises et de la mise en œuvre des techniques n'est pas résolue. Il conviendrait que des laboratoires et de grandes chaires associées au bâtiment se créent.

Les secteurs industriels

Les émissions du secteur de l'industrie manufacturière s'élèvent à 20 % des émissions de gaz à effet de serre de la France. La baisse significative des émissions de ce secteur provient principalement de

celles de protoxyde d'azote ; il reste beaucoup à faire pour l'amélioration de l'efficacité énergétique. L'hyper-efficacité énergétique a déjà ses méthodologies d'analyse énergétique et exergetique utilisant, en particulier, l'intégration thermique qui permet de s'assurer que des gains énergétiques sur des opérations unitaires entraînent bien une optimisation globale du système énergétique que forme une ligne de production. L'utilisation du levier des certificats d'économie d'énergie non standards et le renchérissement inéluctable des énergies fossiles autorisent à lancer une démarche « toutes industries » pour définir les options de récupération d'énergie thermique, en particulier sur les effluents liquides et gazeux.

- **Une démarche systématique comme celle lancée, voici plus de dix ans, pour la limitation des polluants par *Integrated Pollution Prevention and Control* (IPPC) et aboutissant à la définition, pour chaque secteur, des « meilleures technologies disponibles » (MTD) est à promouvoir afin de disposer des MTD pour l'efficacité énergétique des procédés industriels.**

Une première liste des meilleures technologies disponibles pour l'hyper-efficacité énergétique et l'intégration des renouvelables dans les procédés peut ainsi être décrite. Les technologies de pompes à chaleur et de re-compression mécanique de vapeur apparaissent dans le contexte français comme particulièrement prometteurs, compte-tenu du faible contenu carbone de l'électricité.

Filière	Filière industrielle	Position technologique	Croissance du marché	Parts de marché	Intérêt stratégique pour la France	Commentaires
PAC miniaturisée air-air pour le bâtiment	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyennes	Fort	Constructeurs français spécialisés en chauffage et climatisation
PAC pour la production d'ECS	Moyenne	Faible	Moyenne	Faibles	Fort	Essentiel pour éliminer le chauffage d'ECS par résistance
PAC industrielle	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyennes	Moyen	Filière relativement facile à conforter
RMV	Faible	Faible	Moyenne	--	Moyen	Filière essentielle pour l'agro-alimentaire
Cycle Rankine sur effluents thermiques	Emergente	Faible	Moyenne	--	Moyen	Valorisation des effluents thermiques de 200 à 500 °C
Fours ultra rapides	Moyenne	Faible	Forte	Faibles	Fort	Changement radical de l'efficacité des fours

ECS : eau chaude sanitaire - PAC : pompe à chaleur - RMV : recompression mécanique de vapeur

3.5 Autres énergies renouvelables : veille technologique et efforts ciblés

Les sources d'énergie que sont l'éolien, la géothermie et les énergies marines doivent être l'objet d'une veille technologique attentive ou du maintien d'un effort ciblé, afin de se saisir des ruptures technologiques futures dans ces domaines. La question de l'intermittence de production énergétique doit être prise en compte.

3.6 Développer le stockage, la conversion et les technologies de gestion de l'énergie

- **Piles à combustible**

Dans un premier temps, le développement potentiel d'un système de piles à combustible (PAC), en particulier celles à oxydes solides (SOFC³) fonctionnant au gaz naturel pour des applications stationnaires doit être soutenu dans une perspective de développement de la production électrique distribuée permettant aussi de récupérer la chaleur (cogénération). Le développement, pour d'autres marchés (groupes de secours, applications portables, et à plus long terme transports lourds ou publics), de ces technologies ou d'autres (PEMFC) est également recommandé. Le maintien d'un effort sur le stockage de l'hydrogène reste un sujet important au regard des enjeux pour la gestion des énergies intermittentes et le transport.

- **L'électrochimie au service du stockage d'énergie**

Compte tenu des attentes des utilisateurs et des marges de progression technique encore significatives, les travaux de recherche sur cette famille doivent être privilégiés en considérant les axes de recherche suivants :

- réduire les coûts (augmentation de la durée de vie, définition de matériaux moins coûteux, etc.). Les batteries lithium / phosphate constituent une solution efficace à cette problématique ;
- augmenter les performances énergétiques (optimisation des matériaux, etc.) ;
- améliorer la sécurité (choix d'additifs de sécurité améliorés, etc.).

Il est également nécessaire de mener une recherche prospective sur d'autres solutions plus en rupture. En particulier, l'Institut de Recherche Européen sur les batteries « ALISTORE-IRE », qui rassemble tous les acteurs d'une recherche prospective est un élément clé dans toute recherche future : confrontation entre l'expertise et le savoir faire des deux mondes que sont les universitaires et les industriels, il doit être propice à la création et l'innovation.

Dans le domaine du stockage de l'énergie, outre l'hydraulique, il existe en France une réelle compétence sur les batteries, mais une filière industrielle faible. Des utilisateurs de batteries pourraient s'impliquer fortement dans l'ingénierie de systèmes à utiliser, même si la manufacture pourrait se trouver en Asie. La création d'une plateforme technologique s'appuyant sur une filière industrielle conception/partenaire aval sera une avancée.

- **Un besoin d'innovation à l'égard de la chaleur et du froid**

Le stockage, à court et moyen terme, de la chaleur et du froid, doit être associé à des distributions innovantes visant, par exemple, les longues distances. La gestion des stocks a besoin de métrologie « intelligente », secteur qui reste à développer.

- **Création d'une plateforme sur les composants de puissance**

En terme de gestion de l'énergie, les cibles principales sont : le bâtiment intelligent, le couplage des énergies renouvelables au réseau (lui-même intelligent) et le transport. Des progrès sont possibles dans le domaine des composants de puissance et de la gestion des systèmes. La création d'une plateforme sur les composants de puissance avec une centralisation de la recherche est nécessaire.

³ Solid Oxide Fuel Cell

- **L'intelligence des réseaux au service de la maîtrise de la demande d'énergie (MDE)**

Le développement et l'expérimentation de dispositifs intelligents sur les réseaux de transport et de distribution d'énergie constituent une opportunité pour faciliter l'insertion de la production distribuée, développer, à grande échelle, des actions de MDE chez le consommateur final et permettre une meilleure gestion de la demande. Dans ce domaine, les recherches à conduire portent sur :

- Le développement d'outils de commande multi-objectifs permettant de valoriser au mieux la production distribuée et les actions de MDE ;
- La conception de dispositifs de régulation innovants encourageant le déploiement de dispositifs et de services intelligents sur les réseaux ;
- Le développement de techniques de comptage bidirectionnelles à bas coût et de systèmes de pilotage des réseaux permettant d'utiliser la gestion de la demande et la MDE pour fournir des services réseaux ;
- La conception de nouveaux modèles d'affaire pour des opérateurs de stockage et des sociétés de services réseaux proposant des services de MDE pour le consommateur final.

La création d'une plateforme de recherche autour des dispositifs et acteurs existants (ex. : GIE Idea) constituerait une avancée significative dans la mise en œuvre du programme de travail « réseaux intelligents, stockage et maîtrise de la demande d'énergie » construit en 2008 avec les acteurs publics et privés de la recherche.

3.7 Nucléaire : les réacteurs de fission et de fusion, les déchets radioactifs

Le nucléaire français permet aujourd'hui d'assurer 80 % des besoins en électricité du pays, à un coût très compétitif, tout en favorisant l'indépendance énergétique de la France et en préservant significativement des effets du changement climatique (l'énergie nucléaire n'émet quasiment pas de gaz à effet de serre). Les recherches fondamentales et technologiques doivent répondre à l'accroissement de la demande énergétique mondiale, en inscrivant l'énergie nucléaire dans une logique de développement durable (utilisation de la ressource : uranium pour la fission, deutérium pour la fusion ; gestion des déchets sur le long terme) et permettre à l'industrie française de conserver son *leadership* sur le marché mondial.

- **Maintenir et développer l'acquis technologique et le savoir-faire industriel français dans le domaine de la fission nucléaire :**

Les réacteurs de 3^{ème} génération, dont l'EPR constitue la référence française, sont appelés à jouer un rôle majeur pour le renouvellement des parcs existants et pour le développement du nucléaire. Les recherches doivent porter sur l'optimisation de l'utilisation des ressources en uranium au niveau du cycle du combustible et des performances des réacteurs y compris la durée de vie.

Les réacteurs rapides de 4^{ème} génération devront tout en apportant des améliorations significatives sur le plan de la sûreté, être capables, à l'horizon 2040, d'utiliser à l'échelle industrielle tout le potentiel énergétique de la ressource « uranium », de réduire significativement la radiotoxicité des déchets (transmutation des déchets à vie longue) et pourraient permettre des utilisations autres que la production d'électricité (production d'hydrogène, chaleur industrielle, par exemple, ceci étant envisageable dès la 3^{ème} génération). Cela nécessite d'anticiper les sauts technologiques (caloporteurs gaz ou métalliques, tenue des matériaux sous irradiation et haute température), et une mise à niveau

permanente de nos outils de recherche (réacteurs de recherches, installations du cycle du combustible).

Il convient d'étudier les meilleures solutions de gestion pour les déchets radioactifs en répondant aux préoccupations sociétales. La loi du 28 juin 2006, loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs fixe un rendez vous parlementaire en 2015 pour statuer sur le projet de création d'un centre de stockage géologique (opérationnel en 2025), et sur la faisabilité de la transmutation à l'échelle industrielle en 2012.

• **Soutenir la fusion thermonucléaire et le projet international ITER**

La fusion thermonucléaire présente des multiples atouts en tant que source d'énergie. Ses ressources en combustible, quasiment illimitées, peuvent être extraites de l'eau de mer. Elle ne produit pas d'émissions de gaz à effet de serre, elle présente des caractéristiques de sûreté améliorées par rapport aux réacteurs de fission et elle ne génère pas de déchets radioactifs à vie longue de type actinides. Elle nécessite toutefois des milieux extrêmement chauds (de l'ordre de 100 millions de degrés).

La machine ITER constituera une étape essentielle dans la démonstration scientifique et technique de la fusion comme source d'énergie. Le chemin vers un réacteur électrogène de fusion passera, après ITER, par un réacteur démonstrateur électrogène (DEMO) de 1 GW_e qui pourrait être construit à l'horizon de 2040, avant la construction d'un prototype industriel de plus forte puissance.

Les étapes scientifiques et technologiques qui restent à franchir donnent à penser que la production d'énergie par fusion ne pourrait pas être mise en œuvre à une échelle industrielle avant la fin du siècle. La qualification des matériaux résistant aux conditions spécifiques de la fusion, notamment dans l'installation d'irradiation dédiée *International Fusion Materials Irradiation Facility* (IFMIF), est un élément majeur dans la stratégie du déploiement de ces réacteurs.

3.8 Augmenter l'efficacité du système de recherche et d'innovation, tant à l'égard de la recherche amont que des entreprises

D'une manière générale, l'augmentation de la complexité des technologies conduit inexorablement vers une montée en intensité financière des activités de recherche qui entraîne une inévitable concentration des moyens sur un nombre limité de sites. On assiste de ce fait, au plan mondial, en particulier aux Etats-Unis, au Japon, en Chine, en Inde, à la création de Centres d'intégration des technologies qui concentrent moyens et compétences pour atteindre masse critique et stature internationale. Ces Centres d'intégration ont vocation à devenir des acteurs de premier plan au niveau international et à se fédérer, sous forme d'alliances, avec leurs homologues européens. En France, l'émergence à Chambéry de l'Institut national de l'énergie solaire, Centre d'intégration des technologies solaires, a clairement montré la voie. La mise en place prochaine du « Réseau INES » regroupant la communauté de la connaissance nationale dans le domaine du solaire complètera le dispositif.

L'utilisation optimale de ces Centres d'intégration des technologies nécessite conjointement de :

- les irriguer, en amont, par des communautés de la connaissance réparties sur le territoire national par des soutiens appropriés et aptes à leur assurer l'indispensable renouvellement des connaissances et des idées créatrices ;
- les connecter fortement, en aval, avec les industriels du domaine afin d'assurer une valorisation forte des innovations technologiques et de garantir un retour sur investissement conséquent ainsi qu'un retour d'expérience vers la recherche amont.

Le projet de "cluster énergie bas carbone" du Plateau de Saclay, cohérent avec le Plan SET européen, illustre également cette capacité à renforcer la recherche amont sur l'énergie, porteuse d'innovations scientifiques de rupture, pour irriguer plusieurs axes de recherche technologique sur

des thèmes comme les réacteurs nucléaires de fission de 4ème génération (aspects mécanique, matériaux, simulation numérique et expérimentale), le solaire photovoltaïque de couches minces, le réseau électrique et le bâtiment intelligents. Ce Cluster est fondé sur des échanges féconds entre les trois piliers du triangle de la connaissance : recherche, formation supérieure, innovation.

En soutien à cette recherche technologique, la modélisation économique mérite des efforts accrus pour mieux comprendre et anticiper les évolutions des marchés de l'énergie, dans un contexte où le rôle incitatif des Etats sera essentiel et où la crise financière risque de masquer les tensions de fond sur les approvisionnements.