

Rapport sur la stratégie nationale de recherche dans le domaine énergétique

Mai 2007

TABLE DES MATIÈRES

1	UNE PLACE ÉMINENTE POUR LA RECHERCHE DANS LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE	5
1.1	SITUATION ÉNERGÉTIQUE DE NOTRE PAYS	5
1.2	LA PLACE DE LA RECHERCHE DANS LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE.....	6
2	LE CHAMP DE LA RECHERCHE ÉNERGÉTIQUE.....	8
3	LE CONTEXTE POLITIQUE ET LEGISLATIF.....	9
3.1	RAPPEL DES PRINCIPALES ORIENTATIONS DE LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAISE.....	9
3.2	LE CONTEXTE LÉGISLATIF DU RAPPORT.....	10
3.2.1	<i>Loi de programme du 13/07/05 fixant les orientations de la politique énergétique</i>	<i>10</i>
3.2.2	<i>Loi sur la recherche et l'innovation</i>	<i>10</i>
3.2.3	<i>Mode d'élaboration du rapport.....</i>	<i>11</i>
4	LES ORIENTATIONS STRATEGIQUES.....	12
4.1	LES DOMAINES PRIORITAIRES	12
4.1.1	<i>Technologies peu émettrices de GES ou ressources énergétiques alternatives</i>	<i>13</i>
4.1.2	<i>Efficacité énergétique.....</i>	<i>14</i>
4.2	LA MISE EN ŒUVRE DE LA STRATÉGIE ET SON ÉVOLUTION	16
5	APPROCHE THEMATIQUE.....	19
5.1	EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE	19
5.1.1	<i>Stockage, transport et échangeurs thermiques.....</i>	<i>19</i>
5.1.2	<i>Stockage d'électricité</i>	<i>22</i>
5.1.3	<i>Nouveaux concepts pour les réseaux électriques</i>	<i>25</i>
5.1.4	<i>Hydrogène et piles à combustible</i>	<i>28</i>
5.1.5	<i>Transports terrestres.....</i>	<i>33</i>
5.1.6	<i>Bâtiment</i>	<i>38</i>
5.1.7	<i>Gisements pour l'efficacité énergétique.....</i>	<i>41</i>
5.2	ENERGIES RENOUVELABLES	44
5.2.1	<i>Bioénergies.....</i>	<i>44</i>
5.2.2	<i>Géothermie.....</i>	<i>48</i>
5.2.3	<i>Chauffage thermodynamique</i>	<i>54</i>
5.2.4	<i>Solaire Thermique</i>	<i>58</i>
5.2.5	<i>Solaire photovoltaïque</i>	<i>61</i>

5.2.6	<i>Solaire à concentration</i>	64
5.2.7	<i>Energie éolienne</i>	67
5.2.8	<i>Energie hydraulique</i>	69
5.2.9	<i>Energies marines</i>	70
5.3	ENERGIES FOSSILES.....	73
5.3.1	<i>Gisements d'hydrocarbure et raffinage</i>	73
5.3.2	<i>Gaz naturel et Charbon</i>	76
5.3.3	<i>Capture et stockage géologique du gaz carbonique</i>	78
5.4	ENERGIE NUCLÉAIRE.....	82
5.4.1	<i>Eléments de contexte</i>	82
5.4.2	<i>Fission : La recherche pour les installations nucléaires françaises actuelles</i>	84
5.4.3	<i>Fission : Les recherches spécifiques pour la 3^{ème} génération et l'export</i>	85
5.4.4	<i>Fission : Les outils expérimentaux nécessaires aux recherches</i>	86
5.4.5	<i>Fission : Les systèmes nucléaires du futur</i>	88
5.4.6	<i>Fission : Stratégie de recherche retenue pour les systèmes nucléaires du futur</i>	98
5.4.7	<i>Fission : . collaborations internationales pour les systèmes du futur</i>	101
5.4.8	<i>Fission : Synthèse du programme de travail pour les systèmes nucléaires du futur</i>	101
5.4.9	<i>Fission : Les moyens budgétaires associés pour les systèmes du futur</i>	102
5.4.10	<i>Fusion</i>	103
5.4.11	<i>Actions transverses</i>	107
5.5	SOCIO-ÉCONOMIE.....	109
5.5.1	<i>Economie de l'énergie</i>	109
5.5.2	<i>Energie Société Environnement</i>	113
5.5.3	<i>Soutien et analyse de l'innovation</i>	116
6	LES ACTEURS DE LA RECHERCHE ENERGETIQUE	121
6.1	LES AGENCES	122
6.1.1	<i>l' Agence de l'Innovation Industrielle : AII</i>	122
6.1.2	<i>Agence Nationale de la Recherche : ANR</i>	122
6.1.3	<i>Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie : Ademe</i>	123
6.1.4	<i>OSEO innovation</i>	124
6.1.5	<i>Fonds Unique Interministériel – Pôles de Compétitivité</i>	125
6.1.6	<i>Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières (RTPG)</i>	127
6.2	ORGANISMES RÉALISANT LA R&D	127
6.2.1	<i>IFP</i>	127
6.2.2	<i>CEA</i>	128
6.2.3	<i>CNRS</i>	129
6.2.4	<i>CSTB</i>	132

6.2.5	<i>BRGM</i>	133
6.2.6	<i>INRA</i> ,.....	134
6.2.7	<i>Autres organismes</i>	134
6.3	MOYENS IMPARTIS.....	135
6.3.1	<i>La loi organique</i>	135
6.3.2	<i>Les ministères</i>	135
6.3.3	<i>Bilan des budgets</i>	136
6.4	POSITIONNEMENT INTERNATIONAL.....	136
6.4.1	<i>Evolution des budgets en Europe</i>	136
6.4.2	<i>Evolution internationale</i>	138
7	GLOSSAIRE	143

1 UNE PLACE ÉMINENTE POUR LA RECHERCHE DANS LA POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE

La politique énergétique française témoigne d'une remarquable continuité au fil des années. Elle s'est efforcée depuis plusieurs décennies de promouvoir l'indépendance énergétique et la sécurité d'approvisionnement. Elle a également pris en compte au cours des dernières années la question du changement climatique et de la protection de l'environnement comme des enjeux de premier plan.

1.1 Situation énergétique de notre pays

L'offre d'énergie en France :

La France est pauvre en ressources énergétiques d'origine nationale à la différence de plusieurs grands pays industriels, notamment européens qui bénéficient de matières premières relativement abondantes (charbon en Allemagne et en Espagne, pétrole, gaz et charbon au Royaume-Uni, gaz au Pays-Bas, hydraulique en Suisse, etc.).

Dans les années 1950 un vaste programme de construction de grands barrages a été mis en place et, dans les années 70, un programme nucléaire comprenant aujourd'hui 58 réacteurs, a été lancé.

Depuis la fin des années 1970, la production nationale de charbon est passée de plus de 40 millions de tonnes par an à moins de 3 millions de tonnes en 2003, l'extraction s'arrêtant même en avril 2004 avec la fermeture du dernier puits à Creutzwald, en Lorraine.

Le gisement de gaz naturel à Lacq a fourni jusqu'à la fin des années 70 entre 6 et 7 millions de tep de gaz par an, contribuant ainsi jusqu'à 15% de la production nationale d'énergie primaire, mais ce pourcentage est descendu actuellement à 1% (2005).

La production pétrolière n'a guère dépassé depuis 30 ans 3 millions de tonnes par an, en fonction de l'intérêt que les opérateurs ressentaient à investir dans l'exploration-production sur le territoire national, pour s'établir désormais à moins de 1,5 million de tonnes par an, soit légèrement plus de 1% de la consommation primaire de pétrole (2005).

Afin d'assurer dans ce contexte, au mieux des intérêts du pays, la sécurité de ses approvisionnements en énergie, la politique énergétique française doit privilégier une utilisation de l'énergie, la plus efficace possible, et le développement d'une offre nationale d'énergie reposant sur une utilisation optimale de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables disponibles.

La demande d'énergie en France :

La France est le 7^{ème} plus gros consommateur d'énergie au monde avec 275 Mtep en 2004 (source : AIE), derrière l'Allemagne et le Japon. Avec 4,4 tep consommées par habitant, elle se situe à la 18^{ème} place des pays de l'OCDE.

Jusqu'à ces toutes dernières années, la croissance économique de la France, une démographie dynamique, le développement des transports routiers de voyageurs et de marchandises, celui des usages domestiques de l'électricité et les besoins des industries grosses consommatrices d'énergie (sidérurgie, chimie, papeteries, cimenteries,...) ont contribué à une progression soutenue de la consommation d'énergie. Néanmoins, cette tendance n'est pas acceptable, de manière durable, pour des raisons économiques et environnementales (facture énergétique, sécurité d'approvisionnement, changement climatique), de sorte que le Gouvernement s'emploie à prendre des mesures correctrices tout en préservant la dynamique du développement de notre pays.

Quelques chiffres :

La population de la France (62 millions d'habitants) représente 1% de la population mondiale. Son produit intérieur brut (1 710 milliards d'euros en 2005) contribue à hauteur de 3,3% au PIB mondial.

Sa consommation d'énergie primaire (275 Mtep) est de l'ordre de 2,5% de l'approvisionnement énergétique mondial, mais ses réserves fossiles (23 Mtep) ne constituent que 0,01% des réserves connues mondiales.

Elle a mis en vigueur des mesures d'économies d'énergie dès 1974 après le premier choc pétrolier. L'intensité énergétique finale rapporte la consommation énergétique au PIB et mesure ainsi la consommation d'énergie des secteurs finals pour la production d'une unité de richesse. Elle permet d'apprécier l'effort des Français en matière de maîtrise de l'énergie. Entre 1982 et 2005, le gain annuel moyen en intensité énergétique a été de -1,1%.

La France est le 2^{ème} producteur d'énergie nucléaire au monde avec 452 TWh (2005). Elle est le deuxième producteur d'énergies renouvelables de l'Union européenne avec 15,6 Mtep (2005). Cette production d'énergie renouvelable est dominée par le bois énergie et l'hydraulique représentant respectivement 58 % et 28 % du total des énergies renouvelables.

Son taux d'indépendance énergétique est actuellement de l'ordre de 50%.

La France est un pays relativement peu émetteur de CO₂ :

Dans un classement des pays de l'OCDE, la France figure au 7^{ème} rang pour les émissions de CO₂ par habitant (6,2 t CO₂ par habitant) et occupe la 4^{ème} place pour les émissions de CO₂ par unité de richesse produite avec des émissions liées à la combustion d'énergie de 231 kg CO₂ par millier US \$ en 2004 (parité de pouvoir d'achat en dollars de 2000)

1.2 La place de la recherche dans la politique énergétique

Dans le contexte du Protocole de Kyoto, du Plan Climat, des recommandations des rapports Chambolle et Gagnepain, le gouvernement français a fixé le cap pour la France d'une division d'un facteur quatre de ses émissions de CO₂ d'ici 2050.

Tout récemment, la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique est venue offrir une synthèse des grandes lignes d'action en la matière. Elle a de nouveau souligné avec force la place centrale qui incombait à la maîtrise de l'énergie dans une logique de modération de la demande. Elle a aussi mis en évidence que la promotion d'une offre nouvelle en matière énergétique constituait un autre des piliers de l'action à conduire. A ce titre, la recherche et l'innovation occupent une place de choix. C'est également la raison pour laquelle la loi du 13 juillet 2005 a appelé de ses vœux une formalisation de la stratégie nationale en matière de recherche énergétique afin de disposer d'une vision complète et synthétique des actions engagées pour améliorer les technologies existantes ou en promouvoir de nouvelles.

Deux enjeux majeurs dominent la scène énergétique et prendront une place sans cesse croissante dans les préoccupations de tous les Etats au plan international :

- la nécessaire réduction des émissions de gaz à effet de serre afin de prévenir l'aggravation du réchauffement climatique ;
- l'épuisement progressif des ressources énergétiques fossiles.

A l'aune de ces enjeux, la recherche se trouve confrontée à deux questions essentielles :

- comment assurer une efficacité énergétique encore accrue des technologies propres existantes ?
- comment promouvoir des alternatives aux technologies fondées sur l'usage des énergies fossiles ? Cette dernière question renvoie à la maîtrise d'ici une à plusieurs décennies de nouvelles ressources et technologies énergétiques non productrices de gaz à effet de serre.

Au-delà de ces interrogations générales, il va de soi qu'une stratégie de recherche énergétique se doit de déterminer des priorités. Ces dernières ne peuvent qu'être le fruit d'une analyse des diverses options offertes en termes de coût/ avantage du double point de vue de la réduction des impacts environnementaux et climatiques et de l'économie des ressources fossiles ainsi que de la viabilité économique. Sans négliger la place fondamentale des politiques de maîtrise de la demande, il convient

de noter que la recherche et l'innovation constituent à très long terme les éléments déterminants pour la construction d'un avenir énergétique durable.

Se fondant sur les nombreux travaux d'ores et déjà réalisés tant sur ce qu'il est convenu d'appeler les nouvelles technologies de l'énergie que plus largement sur la prospective technologique, le présent rapport vise à mettre en perspective les diverses actions entreprises en France, mais également en liaison avec les partenaires européens et internationaux pour le développement d'une recherche énergétique à même de relever les défis précédemment évoqués.

Les pouvoirs publics, dans le cadre de la politique énergétique nationale qu'ils ont la responsabilité d'élaborer et de conduire, jouent un rôle de premier plan dans la définition et le financement des recherches prioritaires en matière énergétique. En effet, les constantes de temps particulièrement longues dans le domaine de l'énergie, liées tant au cycle de renouvellement des installations et des investissements qu'à la complexité des procédés à élaborer et à la multiplicité des options ouvertes, appellent une implication déterminée des acteurs publics qui apportent une indispensable continuité d'action. Une autre raison de cette forte implication réside dans les cycles propres au domaine de l'énergie. Les prix de l'énergie connaissent des évolutions parfois erratiques. Or, en période de prix décroissant, on peut être tenté de consentir une attention moindre aux questions énergétiques. L'Etat se doit d'être le garant d'une continuité dans l'investissement en matière de recherche, en conservant la vision de long terme indispensable à toute politique énergétique, au-delà des aléas de la conjoncture. Toutefois, l'alliance des efforts de l'initiative privée et l'engagement public constitue une condition sine qua non pour le déploiement de nouvelles technologies énergétiques.

Une dernière remarque est nécessaire concernant les échelles de temps. L'ensemble des pays se trouve aujourd'hui à la croisée des chemins. C'est maintenant qu'il convient de conduire les indispensables efforts de maîtrise de l'énergie et de lutte contre le changement climatique si l'on souhaite renverser les tendances aujourd'hui observées. Cela signifie également que les prochaines années verront ou non jeter les bases des technologies énergétiques indispensables à l'horizon des années 2050 pour préserver un développement énergétique durable. Ce constat met en lumière le rôle essentiel de la stratégie de recherche énergétique qu'il convient aujourd'hui de mettre en œuvre.

Il est nécessaire dans un premier temps de donner une définition de ce que recouvre la recherche énergétique. En cohérence avec l'analyse du contexte énergétique mondial, on peut considérer que la recherche énergétique recouvre l'ensemble des travaux qui visent à définir, analyser, développer ou promouvoir des options qui contribuent à la maîtrise de la demande de l'énergie, au renforcement de l'indépendance énergétique, à la prise en compte des enjeux environnementaux et climatiques liés à l'utilisation de l'énergie ou encore, de manière plus générale, à la promotion d'un développement énergétique durable.

C'est dire que la recherche énergétique couvre un vaste continuum qui peut aller de travaux relativement fondamentaux pour s'assurer de la compréhension de mécanismes physico-chimiques élémentaires à l'analyse socio-économique des enjeux liés à la politique énergétique.

Par nature, la recherche énergétique apparaît pluridisciplinaire. Elle ne saurait se réduire à un domaine académique donné. De plus, elle appelle la mobilisation de compétences diversifiées dont la fertilisation croisée est souvent l'une des sources du succès des travaux entrepris. Quel que soit le caractère plus ou moins fondamental des recherches entreprises, la recherche énergétique conserve un objectif finalisé, celui de la production d'analyses, de procédés, d'outils industriels qui, à terme, contribueront à la satisfaction des objectifs généraux de la politique énergétique. Aussi, le présent rapport met-il délibérément l'accent sur les domaines d'application des diverses thématiques de recherche.

En particulier, dès lors que l'objectif final est bien de disposer de procédés et d'installations, les actions de démonstration doivent constituer une préoccupation de premier plan. Elles constituent une dimension indispensable de la recherche énergétique. Elles accélèrent la mise sur le marché des produits et offrent également un terrain privilégié pour associer recherche publique et recherche privée. En effet, l'association des entreprises suffisamment en amont de projets accroît sensiblement les chances de ces derniers de s'inscrire dans une dynamique de développement.

Enfin, force est de noter que le développement de technologies et de produits ne saurait apporter à soi seul la solution de toutes les questions. Les technologies concernées doivent trouver leur place dans le cadre de nos sociétés. Elles s'y inséreront d'autant mieux qu'elles auront été élaborées dans une perspective permettant la mobilisation des acteurs sociaux concernés. Ainsi, la dimension socio-économique doit-elle également être prise en compte dans la définition du périmètre de la recherche énergétique.

3.1 Rappel des principales orientations de la politique énergétique française

La Loi de Programme fixant les Orientations de la Politique Énergétique (dite loi POPE), aboutissement d'un processus engagé en janvier 2003 avec le Débat national sur les Énergies, fixe les quatre grands objectifs de politique énergétique française et les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir :

- Contribuer à l'indépendance énergétique nationale et garantir la sécurité d'approvisionnement ;
- Assurer un prix compétitif de l'énergie ;
- Préserver la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre ;
- Garantir la cohésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie.

Il s'agit d'objectifs de long terme, qui fixent un cap à l'action de politique énergétique pour les 30 ans à venir, même si la conjoncture de prix élevés de l'énergie que nous connaissons aujourd'hui leur donne une actualité toute particulière. Pour les atteindre, quatre axes majeurs ont été définis :

- Maîtriser la demande d'énergie ;
- Diversifier le bouquet énergétique ;
- Développer la recherche et l'innovation dans le secteur de l'énergie ;
- Assurer des moyens de transport et de stockage adaptés aux besoins.

Pour cadrer les actions à conduire pour l'application de cette loi, la France se donne des objectifs chiffrés ambitieux et définit un certain nombre de programmes mobilisateurs pour les économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables :

- Le soutien à un objectif international d'une division par 2 des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici 2050, ce qui nécessite une division par 4 ou 5 des émissions pour les pays développés ;
- La réduction en moyenne de 2 % par an d'ici à 2015 de l'intensité énergétique finale (rapport entre la consommation d'énergie et la croissance économique) et de 2,5 % d'ici à 2030 ;
- La production de 10 % des besoins énergétiques français à partir de sources d'énergie renouvelables à l'horizon 2010.

Ce dernier objectif pour les énergies renouvelables (ENR) se décompose en objectifs pour les trois vecteurs énergétiques :

- une production intérieure d'électricité d'origine renouvelable à hauteur de 21 % de la consommation en 2010 contre 14 % actuellement ;
- une hausse de 50% de la production de chaleur d'origine renouvelable d'ici 2010 ;
- l'incorporation de biocarburants et autres carburants renouvelables à hauteur de 5,75 % d'ici 2008 et de 7 % d'ici 2010.

La loi de programme sur les orientations de la politique énergétique prévoit également le maintien de l'option nucléaire en France. Le nucléaire contribue de façon décisive à atteindre les objectifs de la politique énergétique définis dans la loi.

Sur le court – moyen terme, trois exercices de programmation définissent des orientations précises pour les moyens de production d'électricité (PPI électricité) et de chaleur (PPI chaleur) ainsi que pour le stockage et le transport de gaz (PIP gaz). Le plan Biocarburants définit également des orientations

précises en matière de taux d'incorporation. L'horizon de ces programmations est 2010 – 2015.

3.2 Le contexte législatif du rapport

3.2.1 Loi de programme du 13/07/05 fixant les orientations de la politique énergétique

La Loi POPE dispose en son article 10 :

- I- « Le ministre chargé de l'énergie et le ministre chargé de la recherche arrêtent et rendent publique une stratégie nationale de la recherche énergétique. Définie pour une période de cinq ans, cette stratégie, fondée sur les objectifs définis à l'article 5, précise les thèmes prioritaires de la recherche dans le domaine énergétique et organise l'articulation entre les recherches publique et privée. L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques évalue cette stratégie et sa mise en œuvre.
- II- Le Gouvernement transmet au Parlement un rapport annuel sur les avancées technologiques résultant des recherches qui portent sur le développement des énergies renouvelables et la maîtrise de l'énergie et qui favorisent leur développement industriel. Il présente les conclusions de ce rapport à l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. »

Dans le contexte de ce rapport, la définition de grandes orientations doit être opératoire et se décliner en termes d'objectifs évaluables et de moyens associés. Cela implique de prendre en compte la diversité des outils de soutien à la recherche, allant de la politique des établissements publics (stipulée dans les contrats d'objectifs) aux crédits incitatifs (portés par les diverses structures mises en place), tout en s'insérant dans une perspective internationale. Ce rapport doit prendre en compte les spécificités françaises qui sont fortes dans le domaine de l'énergie, mais aussi explorer les voies qui peuvent être prometteuses pour le futur du mix énergétique mondial. Il convient de nous appuyer sur nos atouts historiques, mais de ne pas délaissier des domaines potentiellement porteurs d'activité industrielle à l'échelle mondiale.

L'horizon visé, compatible avec les programmations détaillées de la politique énergétique vise la période 2015 – 2050.

3.2.2 Loi sur la recherche et l'innovation

En France, la loi de programme pour la recherche du 18 avril 2006 constitue le volet législatif du Pacte pour la recherche, qui réforme le système de recherche et d'innovation national. Rappelant l'effort financier engagé dans ce cadre, le Gouvernement a réaffirmé les ambitions de la réforme : renforcement des capacités d'orientation de la politique de recherche, rénovation des modes de coopération scientifique qui conféreront notamment aux universités un rôle de premier plan, incitations en faveur de la recherche partenariale et de la recherche privée, renforcement de l'attractivité des carrières scientifiques et incitations au recrutement de jeunes chercheurs.

Pour éclairer les décisions du gouvernement, il a été créé, auprès du Président de la République un Haut conseil de la science et de la technologie (HCST), organe consultatif composé de personnalités de très haut niveau choisies en fonction de leurs compétences dans les domaines scientifiques et technologiques (décret du 22 septembre 2006). Il est chargé d'éclairer les décisions en matière de politique de recherche, avec une vision prospective, et veille à l'adéquation des grands objectifs de recherche avec les attentes et les intérêts de la société. Une fois les décisions stratégiques de la politique de l'Etat et les actions du gouvernement en faveur de la recherche et de l'innovation arrêtées, leur mise en œuvre est assurée par les opérateurs de la recherche publique - établissements d'enseignement supérieur et de recherche, organismes de recherche - dans le cadre d'une politique contractuelle. L'action de ces opérateurs est complétée par l'intervention des agences de moyens qui

contribuent au financement des laboratoires dans le cadre de projets. Ce type de financement est structuré et renforcé par la création de deux agences nationales, l'Agence nationale de la recherche (ANR) et l'Agence de l'innovation industrielle (AII). Pour mieux évaluer la politique scientifique, une Agence de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (AERES) a été créée. L'évaluation sera systématique (tous les projets et institutions financés sur fonds publics seront évalués), transparente (les résultats seront rendus publics) et suivie (il faudra s'assurer que les recommandations auront été prises en compte).

La politique visant à favoriser les coopérations est déjà en œuvre grâce au développement des pôles de compétitivité mis en place en 2005 (voir plus loin). Parallèlement à l'effort engagé en faveur du partenariat public privé, le gouvernement entend inciter les partenariats entre acteurs de la recherche et de l'enseignement supérieur. En fonction des objectifs visés, deux types de partenariats sont proposés et ont été exposés dans le PNR : les pôles de recherche et d'enseignement supérieur (PRES) et les réseaux thématiques de recherche avancée (RTRA). Les PRES seront l'occasion pour les établissements d'enseignement supérieur et de recherche et les organismes de recherche de mutualiser des activités et des moyens, suivant une logique de site. Avant même la promulgation de la loi de programme pour la recherche, de nombreuses initiatives de PRES ont été recensées. Dans le cadre d'un dialogue permanent avec les acteurs, les services du ministère chargé de l'enseignement supérieur et de la recherche accompagneront la structuration de leurs projets et l'émergence de nouveaux. Le soutien que l'Etat pourrait apporter à de telles initiatives se concrétisera dans le cadre de la contractualisation quadriennale avec les établissements partenaires ou dans le cadre d'une contractualisation spécifique. Les RTRA, qui relèvent d'une logique différente mais complémentaire, sont destinés à fédérer une masse critique de chercheurs de très haut niveau pour conduire des projets d'excellence qui favoriseront l'émergence de hauts lieux scientifiques, reconnus parmi les tout premiers au plan international. Au terme d'une période d'examen de différentes candidatures, examen qui s'est tenu entre mai et septembre 2006, treize RTRA sont sur le point d'être retenus. L'Etat a prévu une enveloppe de 300 Millions d'euros pour accompagner ces initiatives

3.2.3 *Mode d'élaboration du rapport*

Le rapport a été préparé conjointement par les deux ministères chargés de la recherche et de l'industrie. Il s'est appuyé tant sur les divers rapports préparés sur ce thème que sur les travaux des organismes compétents. Les acteurs concernés ont été sollicités sous diverses formes, faisant droit à la diversité des modes d'organisation selon les domaines.

Lorsque des structures en charge des thèmes de recherche existaient et réunissaient les acteurs compétents, il leur a été demandé de restituer les réflexions conduites au sein de leurs instances de prospective ou d'évaluation. Il en va ainsi des deux programmes de recherche sur le bâtiment (PREBAT) et les transports (PREDIT) qui comportent tous deux des éléments relatifs à l'énergie. Pour les domaines où n'existait pas ce type de coordination, on s'est attaché à réunir les acteurs concernés sous forme de séminaires thématiques dédiés qui ont permis de passer en revue les orientations envisageables. Tel a été le cas en particulier pour les énergies renouvelables ou le nucléaire. Il a également été recouru aux analyses menées dans le cadre des comités spécialisés de l'Agence nationale de la recherche (ANR) ainsi qu'aux compétences des organismes en charge du domaine, en particulier l'ADEME.

4.1 Les domaines prioritaires

Deux objectifs majeurs doivent être pris en considération pour la détermination des orientations stratégiques :

- la sécurité d'approvisionnement au sens le plus large du terme ;
- la lutte contre l'accroissement du réchauffement climatique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Cela suppose la maîtrise de nos consommations d'énergie et la conduite des actions nécessaires pour s'affranchir d'une trop grande dépendance vis-à-vis des énergies fossiles. Il faut déterminer des solutions pour n'utiliser ces dernières qu'avec une efficacité maximale et, de manière générale, promouvoir une croissance sobre en énergie. Cela suppose également le développement d'un bouquet énergétique peu émetteur de gaz à effet de serre.

En outre, même si le rapport est volontairement concentré sur une approche technologique, le développement de nouvelles options énergétiques ne saurait s'effectuer sans une articulation étroite avec leur insertion dans l'univers social. Cela suppose une recherche socio-économique sur l'énergie à même d'éclairer les enjeux des politiques énergétique et de recherche. Cela implique également que la conception même des technologies s'effectue avec le souci de prendre en compte l'environnement dans lequel elles devront se déployer et le comportement des consommateurs qui décideront, ou non, d'adopter les innovations proposées. De fait, il s'agit de réfléchir aux interactions entre technologies et société afin de bâtir un modèle énergétique durable et efficace.

La loi du 13 juillet 2005 assigne un objectif de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre. Cela suppose des progrès très substantiels en matière d'efficacité énergétique, de poursuite du développement des énergies non émettrices de gaz à effet de serre avec l'objectif d'améliorer leur compétitivité et d'introduction de nouvelles technologies. On observera que deux secteurs d'activité contribuent fortement aujourd'hui tant à la croissance de la consommation énergétique qu'à celle des émissions de gaz à effet de serre. Il s'agit du bâtiment et des transports. Dans les deux cas, les perspectives d'amélioration sont réelles. La recherche énergétique devrait donc porter une attention particulière aux percées envisageables dans ces deux domaines structurants pour les évolutions énergétiques à venir.

Par ailleurs, compte tenu des constantes de temps dans le domaine de la recherche, la disponibilité industrielle et la pleine efficacité de technologies contribuant à réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 supposent de s'engager d'ores et déjà résolument sur la trajectoire correspondante. En particulier, cela implique que, dès que possible et au plus tard avant 2020, les principales options technologiques aient été identifiées et évaluées afin de définir de manière pertinente le bouquet énergétique qui devra être déployé au cours des décennies ultérieures.

L'horizon temporel de la recherche peut donc être articulé autour de cette double échéance de 2020 (disponibilité des technologies au stade de la faisabilité scientifique ou de la démonstration) et 2050 (pleine disponibilité et déploiement effectif des technologies industrielles). En fonction de ces deux échéances, les programmes de recherche peuvent être évalués de manière à déterminer les technologies qui apporteront une contribution significative et celles qui ne pourront contribuer qu'à un horizon temporel beaucoup plus lointain.

La stratégie de recherche énergétique prend donc en compte deux orientations principales :

- l'identification, la mise au point, la validation industrielle de technologies nouvelles n'induisant que pas ou peu d'émissions de gaz à effet de serre ;

- les progrès relatifs aux technologies existantes afin de les rendre plus sobres et de permettre une efficacité énergétique accrue.

4.1.1 *Technologies peu émettrices de GES ou ressources énergétiques alternatives*

Quelques domaines prioritaires peuvent être identifiés :

- la préparation des technologies nucléaires du futur ;
- l'utilisation accrue et optimisée de la biomasse ;
- l'optimisation des technologies liées à l'emploi des autres énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire et la géothermie ;
- le captage et le stockage du dioxyde de carbone.

La production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire de fission constitue un moyen d'éviter les émissions de gaz à effet de serre qui accompagnent le plus souvent la production d'électricité. De ce point de vue, l'énergie nucléaire apporte d'ores et déjà une contribution significative à la limitation des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, les systèmes nucléaires imposent également des contraintes liées à la sécurité des installations et à la gestion des déchets. Il apparaît donc pertinent de disposer d'une nouvelle génération d'installations qui, outre une meilleure utilisation des ressources d'uranium naturel disponibles, pourrait présenter des atouts renforcés de ce double point de vue : intégration renforcée de la gestion des déchets au cycle nucléaire, sécurité accrue des installations. La disponibilité de technologies de réacteur de 4^{ème} génération constituerait un atout précieux pour un recours à l'électricité dans des usages encore plus diversifiés qu'actuellement, dès lors que le contenu en gaz à effet de serre de l'électricité produite serait très faible. Par ailleurs, ils pourraient contribuer à terme à une meilleure valorisation de la ressource énergétique contenue dans l'uranium.

Parmi les renouvelables, l'offre de solution est très ouverte et de nombreuses solutions sont candidates pour produire de l'énergie thermique, de l'électricité ou des carburants de substitution au pétrole sans être dépendantes de stocks miniers, ni émettre de dioxyde de carbone.

Bioénergies, géothermie, chauffage thermodynamique (qui valorise la chaleur de la terre ou de l'eau), solaire thermique, solaire photovoltaïque, solaire à concentration, énergie éolienne, énergie hydraulique, énergies marines sont des filières qui ont toutes dépassées le stade de la faisabilité, mais dont le développement a atteint des stades de maturité inégaux, souvent du fait des efforts de recherche et de développement qui ont été consentis. Le potentiel de toutes ces filières est intéressant, néanmoins, à un moment donné, un certain nombre de critères sont mis en jeu pour orienter les priorités. Parmi ces critères on retiendra le potentiel énergétique et sa contribution à l'indépendance énergétique, l'impact environnemental en émissions polluantes, en effluents, la nature des verrous technologique à lever ainsi que la présence et la motivation des acteurs susceptibles d'en porter le développement...

La biomasse constitue une des ressources fondamentales pour diversifier le bouquet énergétique. En particulier, elle pourrait offrir une alternative partielle crédible aux combustibles d'origine fossile si le cycle de production et de transformation de la ressource était optimisé par rapport aux options actuelles et rendu économiquement plus performant.

Les bio-ressources peuvent constituer une solution majeure de production de combustibles ou de carburants, de chaleur ou d'électricité. Il s'agit également de développer l'utilisation de la biomasse pour les autres usages, encore dépendants des hydrocarbures (matière première à usage chimique) au travers l'animation du GIS AGRICE.

Il s'agit de déterminer des itinéraires cultureux permettant d'obtenir une production de biomasse avec un rendement de matière sèche ou de réserves lipidiques élevé, tout en minimisant les impacts

environnementaux, et de mettre au point les technologies qui permettront d'exploiter la partie ligno-cellulosique des plantes.

Sur le premier point, des développements en terme d'acceptabilité, de concurrence d'usage des sols sont nécessaires. Le choix des priorités entre les différentes filières de valorisation des bio ressources (alimentation, chimie, énergie, et au sein de cette dernière catégorie : carburants, combustibles, électricité, ...) relèvent de cette même approche.

Pour les technologies, deux pistes coexistent, l'une thermochimique qui passe par la production d'un gaz de synthèse, l'autre par la voie biologique en réalisant une hydrolyse enzymatique. Dans les deux cas des démonstrations seront nécessaires. La voie biologique est plus difficile sur le plan scientifique, alors que la voie thermochimique pose davantage de problèmes technologiques. L'absence d'industriels français très moteurs sur la piste thermochimique et l'efficacité potentielle plus importante de la bio transformation peuvent inciter à retenir une priorité, si cela s'avérait nécessaire, sur cette dernière voie. La conversion thermique de la biomasse a atteint un degré de maturité important et appelle désormais plus un accompagnement de l'innovation qu'un programme de recherche massif.

L'énergie photovoltaïque représenterait un potentiel très important s'il existait des technologies plus efficaces et moins coûteuses. De ce point de vue, elle appelle une attention particulière.

La France dispose d'une forte compétence de recherche dans le domaine photovoltaïque, tant privée que publique, et d'acteurs industriels présents sur le territoire national. Les enjeux énergétiques de cette option relèvent du moyen et long terme et nécessitent un appui public à la R&D ainsi qu'une forte articulation entre les laboratoires publics et les entreprises.

La filière est segmentée en 3 volets :

- le silicium cristallin, qui atteint la maturité technologique et mais doit réduire ses coûts ;
- les couches minces, moins matures, mais dont on attend à moyen terme une baisse significative des coûts de production, quitte à accepter un rendement plus faible ;
- les cellules organiques, regroupant les applications à plus long terme avec des coûts très réduits.

Un axe de recherche important concerne la mise en système de ces équipements, pour en obtenir la meilleure valeur ajoutée tant en termes économiques qu'en termes d'usages et d'utilité pour l'utilisateur. Ce volet doit être développé car il existe d'ores et déjà des niches dans lesquelles ces applications pourraient avoir un rapport coût bénéfice favorables et où pourrait se développer un marché en appont des soutiens publics.

Enfin, la voie de la capture et du stockage du dioxyde de carbone est considérée au niveau international comme incontournable pour continuer à utiliser à moyen / long terme les énergies fossiles (notamment le charbon) dans les grandes installations fixes. Elle constitue une approche intéressante en complément du déploiement de technologies non productrices de gaz à effet de serre. En effet, pour la part énergétique qui nécessiterait en tout état de cause le recours à des énergies fossiles, elle offrirait la possibilité de s'affranchir des rejets atmosphériques de gaz. Il s'agit ainsi d'une voie de recherche complémentaire et qui appelle encore d'importants développements en termes de démonstration. En articulation avec le volet capture et stockage, il convient de noter l'importance de technologies d'utilisation efficace du charbon, que ce soit pour la combustion avec les installations correspondantes ou pour les diverses transformations du charbon avec les procédés nécessaires.

4.1.2 Efficacité énergétique

Les enjeux de recherche sont multiples et peuvent être déclinés tant par secteur que de manière plus générique. Là aussi, quelques domaines prioritaires peuvent être identifiés :

- le stockage de l'énergie ;

- le domaine du bâtiment ;
- les transports ;
- les piles à combustible et la production d'hydrogène.

Le stockage de l'énergie représente un enjeu majeur. En effet, la capacité de stocker et transporter l'énergie représenterait un atout important dans la réduction des déperditions actuellement constatées. En outre, le développement des productions décentralisées d'énergie, notamment renouvelables et intermittentes, confère une place importante aux technologies de stockage. Les réseaux de distribution de l'énergie seraient ainsi conduits à jouer davantage un rôle de mutualisation des besoins et des excédents de production décentralisée, modifiant ainsi leur conception et leur gestion (bâtiments à énergie positive). Ces enjeux s'appliquent aux réseaux d'électricité, de chaleur, voire aux potentiels réseaux d'hydrogène. Il s'agit de recherches à caractère technologique, incluant le stockage électrochimique, mais également de recherche sur les usages et sur les interactions entre modes de consommation de l'énergie et fonctionnement des réseaux.

Le stockage de l'électricité représente également un enjeu considérable dans le domaine des transports si les technologies, notamment électrochimiques, permettent d'améliorer les capacités massiques et volumiques de stockage, la fiabilité des batteries et leur longévité. C'est également une composante essentielle de la gestion des flux dans la production décentralisée qui vise les applications stationnaires, avec des contraintes de capacité massique ou volumique moindre que dans le transport. L'obtention des batteries embarquées permettant une autonomie de 200 kilomètres et commercialisées à un coût compétitif pourrait être envisagé vers 2015 si les espoirs fondés sur les recherches actuelles se matérialisent.

Le domaine du bâtiment appelle un effort déterminé pour concevoir des édifices dont la consommation énergétique soit fortement réduite dans un premier temps, puis s'attache à utiliser au mieux les sources d'énergies renouvelables. L'effort de recherche devrait viser non seulement la conception des bâtiments du futur, mais également la mise au point de technologies de rénovation innovantes dans un contexte où le taux de renouvellement du parc immobilier est faible.

La réalisation commerciale de bâtiments neufs dont la consommation énergétique est inférieure à 50 kWh/m²/an devrait être obtenue avec un surcoût acceptable à l'horizon 2015-2020 moyennant un important effort de formation des professionnels du secteur et l'amélioration des technologies déjà disponibles. En revanche la réhabilitation des bâtiments existants à des niveaux de performance équivalents aux seuils réglementaires du neuf (80 kWh/m²/an) voire inférieurs (50 kWh/m²/an), et à des coûts acceptables, nécessite encore des recherches, des développements et des démonstrations. A l'horizon 2010 ces technologies devraient être disponibles et commencer à pénétrer les marchés de la construction. La réalisation de bâtiment à énergie positive par l'intégration d'énergies renouvelables dans le bâti devrait pouvoir être banalisée dans le neuf à l'horizon d'une ou deux décennies. Ces gains d'efficacité sont cohérents avec l'objectif d'une division par 4 des émissions de ce secteur d'ici 2050.

En matière de transport, une première ligne d'action consiste à poursuivre les efforts déjà engagés pour améliorer les technologies existantes en termes de réduction des consommations. Au-delà, il convient d'examiner les technologies alternatives de propulsion qui pourraient utiliser des technologies peu productrices de gaz à effet de serre et s'affranchiraient du recours à des énergies fossiles : véhicules électriques, véhicules dotés de piles à combustibles. Une précision s'impose toutefois : s'il est plus commode pour l'exposé de traiter les technologies par domaine d'application, il convient toutefois de ne pas perdre de vue l'approche intégrée. En effet, la pertinence d'une solution électrique ou hydrogène suppose parallèlement d'une part la disponibilité de technologies de production efficaces, d'autre part un réseau de distribution adéquat.

A court et moyen terme des gains très importants peuvent encore être réalisés sur les véhicules et motorisations « classiques » (combustion, poids, frottements, aérodynamisme...). Un gain de 30% est envisageable à l'horizon 2015-2020 et de 50% à l'horizon 2030. Ces gains sur les véhicules essence et diesel peuvent s'accompagner de l'hybridation progressive des véhicules si des progrès sont obtenus

dans la recherche sur les batteries. A l'horizon 2020-2025 la part des véhicules alternatifs (électriques, hybrides...) pourrait atteindre de l'ordre de 10% du bilan énergétique de l'automobile, les biocarburants assurant de l'ordre de 15% de la consommation (75% des carburants seraient, à cet horizon encore d'origine fossile) compte tenu des délais de la recherche et de la pénétration dans les marchés. L'utilisation de l'hydrogène dans des véhicules à piles à combustibles pourrait émerger vers 2025 si des progrès importants sont obtenus sur les technologies (performance, fiabilité et baisse des coûts).

L'approche actuelle et à court terme peut être qualifiée de « sans regret » : les recherches s'orientent sur des éléments de technologie qui pourront trouver leur utilité quel que soit le modèle technologique finalement retenu pour les transports. Le secteur des transports appelle en ce sens une réflexion plus globale sur son devenir : verra-t-on comme par le passé une technologie prendre le pas sur toutes les autres, ou va-t-on vers une coexistence de plusieurs technologies sobres ? A cet égard, au delà des technologies, le développement de nouvelles formes d'organisation de la mobilité en ville et le degré d'étalement urbain pourraient notamment avoir un impact important sur le modèle de transport futur.

Le développement des piles à combustible et la production d'hydrogène. L'émergence d'un nouveau vecteur énergétique pourrait constituer une opportunité intéressante. Un premier point d'application se situe dans le domaine des piles à combustible stationnaires : on peut attendre à moyen terme le développement d'usages stationnaires (premières applications envisageables en 2015) et à plus long terme des développements pour les usages embarqués (début de commercialisation envisageable en 2025-2030 et part de marché significative en 2050).

A la frontière entre les deux thématiques précédentes doit également être soulignée la problématique de la production et de l'utilisation décentralisée. Depuis la fin du XIX^{ème} siècle, la prise en compte des besoins énergétiques nouveaux s'est le plus souvent traduite par le développement de réseaux de production et de distribution de l'énergie. Ces derniers sont apparus comme des formes très efficaces et rationnelles de prise en compte des besoins énergétiques. Ils se sont progressivement substitués à des formes plus locales d'utilisation. Toutefois, ces réseaux présentent leurs limites tant en termes d'extension possible que d'efficacité énergétique optimale. Aussi, une réflexion sur l'utilisation décentralisée de l'énergie apparaît pertinente dans le cadre de la politique de recherche. Elle se situe en effet à la jointure entre les préoccupations de maîtrise de l'énergie, d'implication accrue du citoyen, d'émergence de nouveaux vecteurs énergétiques permettant un stockage local de l'énergie (cas des piles à combustible avec un stockage intermédiaire d'hydrogène). De plus, cette question nécessite également un éclairage socio-économique sur le développement de telles pratiques. Il s'agit donc d'une problématique transversale et qui devrait recueillir au cours des années à venir une attention renforcée.

Les indications précédentes n'épuisent évidemment pas le panorama des technologies ou des options pertinentes pour explorer de nouvelles solutions énergétiques. Il existe en effet des thématiques de recherche dont le développement s'inscrit dans une perspective temporelle plus lointaine que 2050, ainsi la fusion thermonucléaire contrôlée. Par ailleurs, d'autres thématiques de recherche sont susceptibles d'apporter une plus-value de moindre importance, mais néanmoins nécessaire dans une perspective de diversification du bouquet énergétique. Enfin, sans que cela renvoie à la nécessité d'investissements de recherche majeurs, certains domaines appellent la poursuite de développements destinés à renforcer l'efficacité et la compétitivité des technologies correspondantes. Ces divers aspects seront déclinés de manière plus détaillée dans la prochaine section du rapport qui passera en revue l'ensemble des thématiques de recherche.

4.2 La mise en œuvre de la stratégie et son évolution

La loi du 13 juillet 2005 a demandé qu'une stratégie de recherche en matière énergétique soit élaborée. Cet exercice apparaît d'autant plus utile que la diversité des problématiques liées à l'énergie et celle

des acteurs impliqués suppose que les divers protagonistes partagent une vision commune des thèmes d'intérêt des perspectives de développement. Tel est l'un des objets principaux du présent document.

Au-delà de cet acquis, plusieurs éléments apparaissent nécessaires pour que la mise en œuvre des orientations stratégiques puisse s'effectuer de manière satisfaisante :

- une évaluation régulière de l'avancement des diverses voies de recherche devra être effectuée afin de permettre une actualisation de la stratégie de recherche. Cette évaluation devra être conduite dans le cadre d'une instance où les divers points de vue puissent être confrontés ;
- les interventions des différents acteurs devront prendre en compte les différents aspects du développement des recherches : aspects cognitifs, développement, démonstration. Dans chaque domaine, les priorités stratégiques devront, autant que faire se peut, être déclinées sous forme de plans de développement en identifiant bien les apports spécifiques de chaque acteur ;
- la coopération internationale devra être une priorité afin de concentrer les investissements conduits par la recherche publique sur les verrous technologiques les plus significatifs ;
- les recherches devront être régulièrement examinées dans une perspective systémique afin de s'assurer de la cohérence des divers développements et de leur capacité à s'insérer dans une perspective cohérente en termes de politique énergétique (de manière élémentaire, on mentionnera la nécessaire cohérence en termes de rythme de développement entre la disponibilité d'une ressource et les outils nécessaires pour en tirer parti) ;
- un outil de suivi des ressources mobilisées et de la conformité par rapport aux prévisions devra être mis au point et régulièrement tenu à jour.

Il convient également d'attirer l'attention sur l'état d'avancement actuel de la réflexion. Le passage en revue des diverses thématiques de recherche liées à l'énergie (cf. infra) fournit une première vision d'ensemble. La présente section s'est efforcée de souligner les points forts sur lesquels l'accent devrait porter compte tenu des compétences dont dispose la recherche française et de leur intérêt intrinsèque pour l'élaboration d'un avenir énergétique durable. Cela conduit à mettre en évidence quelques thématiques prometteuses qui appellent un effort de recherche concerté. Cette description des principales voies et ce premier jugement sur leurs atouts respectifs ne constitue pour autant qu'une première approche.

Il serait également nécessaire de consacrer une attention accrue à une approche transversale des questions énergétiques. L'intégration entre approche technologique et apport des sciences de l'homme et de la société a déjà été mentionnée. Cet aspect devrait faire l'objet d'une attention soutenue, en particulier sous forme de programmes de soutien à la recherche réunissant les deux aspects. Au registre des approches transversales, il serait utile de développer des évaluations transversales permettant de disposer d'une vision globale de l'impact énergétique de diverses formes d'organisation de la société ou de l'industrie. En effet, il ne suffit pas de disposer des meilleures technologies énergétiques, chacun étant la plus sobre individuellement, si la combinaison de ces dernières ne se réalise pas harmonieusement pour répondre aux enjeux actuels en matière d'environnement et de changement climatique. A titre d'exemple, l'approche au travers du prisme du contenu en carbone des divers produits ou encore la hiérarchisation des enjeux en matière de réduction des émissions de gaz à effet, appréhendés sur le long terme, seraient des thèmes à approfondir.

Il s'agit en effet du premier exercice du genre qui demande encore à être approfondi. Il conviendrait en particulier de mieux cerner le poids respectif des différents domaines et de définir plus précisément les trajectoires industrielles associées. Ce travail d'approfondissement pourrait être assuré dans le cadre d'une déclinaison de la stratégie menée par les acteurs du domaine impliqués dans les différents champs techniques. En particulier, le haut conseil de la science et de la technologie ainsi que les agences publiques en charge de la recherche pourraient apporter une contribution importante à cette transcription de la stratégie dans la pratique. En termes de processus, le présent rapport pourrait être

soumis à une large discussion, conduisant à préciser les analyses et à mobiliser les acteurs autour de quelques thèmes, favorisant ainsi les processus d'organisation de la recherche. A l'issue de cette étape, une nouvelle version tenant compte des apports de chacun des acteurs pourrait être produite, conduisant à une focalisation accrue sur les thèmes retenus comme indispensables à l'issue de cet examen.

Cette partie passe en revue les divers thèmes de recherche énergétique. Dans chaque cas, on s'attache à dresser un bref état des lieux, à présenter les acteurs de la recherche, le contexte de la coopération internationale et à établir les perspectives de travaux de recherche associés à des objectifs aussi précis que possibles relatifs aux produits et aux concepts développés (par exemple, la baisse de coût attendue d'un composant). Les orientations retenues s'inscrivent dans le cadre stratégique présenté dans les sections précédentes.

On passe d'abord en revue les thèmes de recherche dans le domaine de l'efficacité énergétique, puis celui de l'offre énergétique (énergies renouvelables, énergies fossiles, énergie nucléaire) et enfin les travaux conduits en matière de socio-économie de l'énergie.

Concernant l'efficacité énergétique, le chapitre se concentre sur les technologies relatives aux vecteurs énergétiques (chaleur, électricité, à plus long terme hydrogène), à de nouveaux modes de conversion de ces vecteurs (piles à combustible), ainsi qu'à des technologies spécifiques relatives aux transports terrestres et aux bâtiments.

L'ensemble des technologies relatives à l'offre énergétique est traité dans des chapitres séparés même si la frontière avec l'efficacité énergétique est parfois tenue (par exemple : les pompes à chaleur, le solaire photovoltaïque intégré au bâtiment ...). L'intégration de ces équipements de production dans des systèmes complets peut par contre générer des besoins technologiques abordés dans les sections consacrées aux transports terrestres et au bâtiment.

5.1 Efficacité énergétique

L'amélioration de l'efficacité du système énergétique relève de trois modes d'action complémentaires :

- la diffusion de produits sobres en énergie, déjà mûrs technologiquement, et bénéficiant de mécanismes spécifiques de soutien ;
- l'évolution des usages et des comportements ;
- la mise au point de nouvelles technologies, au niveau des composants ou de l'optimisation des systèmes.

Le deuxième point est traité dans le chapitre consacré à la socio-économie.

5.1.1 *Stockage, transport et échangeurs thermiques*

La consommation de chaleur est le premier poste de consommation finale d'énergie en France. En 2004, sur un total de 161 Mtep de consommation finale d'énergie, un peu plus de la moitié (85 Mtep) a été consommée sous forme de chaleur.

Les enjeux de l'innovation technologique dans le secteur sont nombreux, on peut citer : adapter la production de la chaleur à la demande par le stockage et le transport à longue distance vers les lieux de consommation, valoriser les rejets thermiques et améliorer l'efficacité énergétique des machines par le développement d'échangeurs thermiques performants. Les applications se situent dans tous les secteurs de consommation d'énergie ainsi que dans le secteur de la production (centrales thermiques ...).

5.1.1.1 Etat de l'art des technologies

Les échangeurs thermiques sont des surfaces à coefficient d'échange élevé pour les échangeurs liquide-liquide, avec une évolution vers les échangeurs à haute compacité et haute performance, et de

coefficient plus faible pour les échangeurs gaz-liquide ou air/air.

Le stockage d'énergie thermique peut se faire par plusieurs moyens :

- Stockage par chaleur sensible : eau, huiles synthétiques, vapeur d'eau sous pression, sels fondus sans changement de phase, céramiques, béton, ... ;
- Stockage par chaleur latente : transitions de phases S/L, L/G, S/G, S/S de produits organiques (paraffines, acides gras, ...) ou inorganiques (eau, sels, métaux, ...) ;
- Stockage thermochimique par réactions chimiques endo/exothermiques, adsorption, absorption.

Les travaux actuels portent sur la recherche de matériaux à bas prix et longue durée, avec des propriétés thermophysiques améliorées (densité énergétique & puissance) que ce soit pour le stockage de chaleur basse température ($T < 120\text{ °C}$) ou le stockage de chaleur haute température ($T > 120\text{ °C}$). Par exemple il peut s'agir de matériaux à changement de phases ou de stockage thermochimique par des réaction de sorption solide-gaz. C'est surtout pour des températures entre 120 et 500°C que les systèmes de stockage classiques ne sont pas adaptés.

Actuellement, les réseaux de transport d'énergie thermique (chaud ou froid) sont basés sur le transport de chaleur sensible (eau chaude ou glacée) ou latente (vapeur d'eau ou coulis de glace) du fluide transporté. En raison de leur importante déperditions thermiques, ces réseaux se limitent aux distances inférieurs à dix kilomètres et forment essentiellement des réseaux urbains.

5.1.1.2 Marché

Les marchés actuels des échangeurs thermiques sont des marchés de renouvellement dans le domaine des procédés industriels avec un faible taux de croissance. Le secteur le plus porteur pour les échangeurs compacts est celui du chauffage, de la climatisation et du froid.

Pour le transport de la chaleur c'est le marché du réseau urbain de chaleur et de froid des sites industriels, sans développement technologique à l'heure actuelle ou celui de valorisation des rejets thermiques. Dans le futur, le développement de centrales thermiques à énergie fossile avec récupération de CO₂ ou le chauffage par centrales nucléaires nécessiteront le transport de chaleur sur de longues distances.

Si la distribution de la chaleur et du froid ne représente actuellement que 6 à 7 % des énergies consommées dans le secteur résidentiel et tertiaire, ce procédé est appelé à être développé au moins pour deux raisons : la nécessaire concentration des sites de production de chaleur à partir de combustibles fossiles pour capturer le CO₂ et le développement probable des zones d'îlotage énergétique associées aux construction de nouveaux quartiers et potentiellement l'émergence de nouvelles sources de chaleur valorisables (par exemple celle générée par les réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération). Très peu de recherches ont jusqu'à présent soutenu le développement des réseaux de distribution de la chaleur et du froid qui, de ce fait, ont été édifiés à partir de concepts empiriques.

Les marchés du stockage sont de natures différentes suivant le niveau de température :

- température sous ambiante : le froid industriel (agroalimentaire, ...), le transport (médical, produits congelés ...), le conditionnement d'air, ... ;
- basse température ($< 120\text{ °C}$) : habitat, récupération de rejets thermiques, mais aussi dans le cas d'utilisation d'énergie intermittente, de cogénération à basse température... ;
- haute température ($> 120\text{ °C}$) : énergie solaire concentré, cogénération, piles à combustible,...

5.1.1.3 Tissu industriel et effort actuel de R&D en France

Des compétences en matière de recherche existent dans un grand nombre de laboratoires publics : CNRS et Universités de Pau, d'Orsay, de Chambéry, de Perpignan, ..., l'INSA de Lyon, UT de Compiègne, ENSCP de Bordeaux, CEA GREThE de Grenoble, CEMAGREF d'Antony, ...

Sur les marchés de niche des échangeurs thermiques on trouve des acteurs spécialisés : Barriquand, CIAT, Heatric, Spirec, Morgona, Nordon, ...

5.1.1.4 Partenariats internationaux

Depuis 1994 dans le cadre du IV^{ème} PCRD la France s'est impliquée dans le programme Joule-(R&D) – Thermie (démonstration) devenu le programme énergie dans le V^{ème} PCRD

La France vient d'adhérer à l'accord de mise en œuvre consacré au stockage énergétique (« Energy Conservation Through Energy Storage ») de l'Agence Internationale pour l'Énergie.

5.1.1.5 Perspectives de R&D

Les avancées technologiques pouvant jouer en faveur d'une meilleure valorisation de la chaleur fatale (entre autre l'énergie rejetée en France par les centrales nucléaires, soit de l'ordre de 80 Mtep non valorisés) concernent en priorité le transport d'énergie thermique afin de réduire les coûts d'investissement et les pertes d'énergie.

Des travaux portent par exemple sur les technologies permettant de transporter la chaleur sous forme de gaz à température ambiante, impliqué dans des processus thermo-chimiques (endothermique à la source, exothermique au niveau de l'usage). L'horizon visé, pour un transport sur quelque kilomètres, est de 10 – 15 ans (on en est actuellement à l'échelle du laboratoire sur des distances de quelques mètres). Une application réellement opérationnelle est envisageable à l'horizon 2030.

L'échangeur thermique reste un élément essentiel de l'efficacité énergétique d'un procédé. A ce titre, l'impératif de performance de ces équipements est particulièrement d'actualité.

Pour les technologies traditionnelles, le marché peut connaître une nouvelle croissance du fait du surenchérissement des énergies. Les efforts de R&D peuvent se focaliser sur l'intégration dans les procédés de préférence aux développements de technologies innovantes.

D'une manière générale toutes les innovations qui aideront à diminuer la facture énergétique tant chez les industriels que chez les particuliers généreront un marché.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon ¹
Echangeur haute et très haute température	Matériaux HT, techniques d'assemblage Comportement thermomécanique du produit Echangeurs supercritiques Encrassement	MT
Echangeurs multifonctionnels	Architecture de l'échangeur-réacteur Echangeur compact, échangeur chaotique Modèles de micromélange	MT
Echangeurs à très haute compacité	Technologie bas coût pour les grandes séries Intensification des échanges, encrassement Micro structuration de surface des mini canaux Comportement thermohydraulique Echangeurs à contact direct ; microcaloducs	MT
Stockage par chaleur latente	Matériaux, (contenu, contenant, bas coût) Recherche d'agent de nucléation Modélisation Stockage dynamique de fluides frigoporteurs diphasiques Caractérisation thermo-physico-chimique des fluides chargés Matériaux à changement de phase à intégrer dans l'enveloppe des bâtiments	MT
Stockage par chaleur sensible	Stockage thermique saisonnier en sous-sol	CT
Stockage thermo-chimique	Matériaux composites à forte densité énergétique et bas coûts	

¹ CT : < 5 ans

MT : 5 – 10 ans

LT : > 10 ans

	Amélioration de la microstructure du solide adsorbant	LT
Nouveaux réseaux – réseaux multi-énergies	Développement d'outils de diagnostic de l'état thermique et mécanique Fiabilité - efficacité Automatisation de la conduite Polygénération Réseaux d'ilotage	MT
Transport de chaleur et froid à longue distance (TCLD)	Démonstration de l'intérêt du TCLD pour distances > 10 km Analyse de cycles thermodynamiques avec différents réactifs et procédés Couplage de différents procédés mécaniques/chimiques Etudes thermo-économiques	MT MT

Tableau 1 – Priorités de recherche stockage / transport / échangeurs de chaleur

5.1.2 Stockage d'électricité

Il y a aujourd'hui plusieurs applications stationnaires du stockage d'électricité : le transport et la distribution de l'électricité (équilibre offre demande, réserves), la qualité du courant (micro coupures, etc.) et les alimentations ininterrompues, et les sites isolés alimentés par des énergies renouvelables.

Le système de production, de transport et de distribution d'électricité actuel qui est centralisé, ne fait quasiment pas appel au stockage (la puissance mondiale de stockage sur les réseaux représente seulement 2,6 % de la puissance de production).

Pour le stockage d'énergie électrique embarquée (automobile, tramway, véhicule militaire, etc.) La réduction de la consommation de carburants d'origine fossile des véhicules terrestres dans un objectif de réduction de gaz à effet de serre et de raréfaction de la ressource et les réglementations de plus en plus drastiques en matière de polluants locaux conduisent au développement de technologies d'électrification progressives des motorisations.

5.1.2.1 Etat de l'art des technologies

L'énergie électrique ne se stocke pas directement (sauf pour les super condensateurs sous forme électrostatique et les supraconducteurs sous forme magnétique) et il faut la convertir sous une autre forme d'énergie (chimique, mécanique, thermique, etc.). Il s'agit donc dans la plupart des cas de stockage indirect. On distingue le stockage à grande échelle du stockage à moyenne / petite échelle.

5.1.2.2 Stockage à grande échelle

- L'hydraulique gravitaire (station de pompage-turbinage) est la technologie la plus répandue dans les grandes puissances (par exemple Revin – Saint Nicolas de puissance installée de 800 MW). La contrainte majeure est liée à la nécessité de sites au relief adapté.
- L'air comprimé en caverne est une technologie relativement mature avec quelques réalisations de grande puissance (par exemple Hundorf en Allemagne, P=290 MW, T=3 h). Comme pour l'hydraulique gravitaire, il faut un site spécifique (géologie). Attention à la définition du rendement : pour restituer 1 kWh au réseau, il faut utiliser 0,75 kWh d'électricité durant la phase de pompage et brûler 1,22 kWh de gaz naturel durant le déstockage (on brûle du gaz naturel pour réchauffer l'air dans une chambre de combustion avant de le détendre dans une turbine).
- Les technologies plomb (Pb) et nickel-cadmium (NiCd) ont été utilisées pour des projets de stockage à grande échelle pour éviter des renforcements de réseaux (exemples : Chino, P=10 MW et T=4 h, ou Vernon, P=3 MW et T=1.5 h, aux USA).
- L'électrochimie à circulation permet de s'affranchir du maximum de capacité inhérent aux

accumulateurs : les composés chimiques responsables du stockage de l'énergie sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. L'électrolyte est pompé vers des réservoirs externes dont le volume représente l'énergie stockée. Des systèmes sont en expérimentation et peu de données sur la rentabilité économique de cette filière sont disponibles.

- Le stockage de thermique à réfractaires avec turbine : on chauffe des briques avec des résistances électriques lors du stockage, de l'air chauffé au contact des réfractaires est injecté dans une turbine en déstockage. Cette technologie est à l'étude, il n'existe aucun prototype. Les coûts d'investissement envisagés sont très prometteurs.

5.1.2.3 Stockage à moyenne/petite échelle

- Super condensateurs : ces composants sont adaptés aux faibles constantes de temps. On les retrouve dans les systèmes assurant la qualité du courant.
- Les accumulateurs électrochimiques : il existe de nombreux couples électrochimiques, le plus répandu est le Plomb/acide (Pb). Ils ont une excellente énergie massique (Wh/kg) mais souvent une faible durée de vie en cyclage de grande amplitude (grande profondeur de décharge), le Pb en particulier. La technologie lithium-ion, malgré son coût élevé, est prometteuse car elle possède la meilleure énergie massique et la meilleure cyclabilité (durée de vie élevée).
- Les volants d'inertie (volant d'inertie associé à un moteur/générateur avec des paliers magnétiques dans une enceinte de confinement sous très basse pression) : Cette technologie offre une très grande capacité de cyclage mais elle est pénalisée par son autodécharge. Les volants d'inertie sont des systèmes à faible constante de temps.
- L'air comprimé en bouteilles : cette technologie relativement accessible est pénalisée par un rendement faible (pertes énergétiques importante lors de la phase de détente).
- L'hydrogène associé à une pile à combustible (PAC) : ces systèmes sont basés sur une chaîne de conversion électrolyseur/H₂/PAC. Cette technologie nécessite des coûts d'investissement très élevés pour un rendement faible (< 0.5) et la durée de vie est insuffisante pour des applications couplées aux réseaux électriques.
- Les supraconducteurs : ces composants fonctionnent à des températures très basses (cryogénie), ce qui rend leurs applications industrielles, pour l'instant, très difficiles. Comme pour les super condensateurs, ces systèmes sont bien adaptés aux faibles constantes de temps.

Pour comparer ces différentes technologies on compare notamment les couples puissance / constante de temps (c'est à dire la durée de vie de conservation) en fonction des différents domaines d'applications.

5.1.2.4 Stockage embarqué pour la partie transport

Parmi les technologies à développer prioritairement, l'hybridation entre un moteur thermique, un moteur électrique et une batterie, est sans doute une évolution technologique majeure pour améliorer significativement le rendement énergétique des groupes motopropulseurs tout en minimisant les émissions. Elle ouvre la voie à une électrification douce d'un véhicule thermique sans bousculer les habitudes des utilisateurs. De plus, elle reste compatible avec d'autres évolutions possibles à long terme : biocarburants, pile à combustible alimentée par hydrogène ou véhicule électrique.

Pour les particuliers, le véhicule hybride rechargeable sur le réseau électrique (VHR) ayant une autonomie électrique raisonnable devient de ce fait une option crédible à un terme relativement proche.

Dans ce contexte le stockage de l'énergie électrique par voie électrochimique connaît des développements importants au travers de deux technologies : celle des batteries ou accumulateurs et celle des super-condensateurs.

- En matière de batteries, pour les premiers modèles de véhicules hybrides, le choix s'est porté sur la technologie Nickel Métal Hydrure (NiMH). Elle est mature, offre une excellente puissance en charge ou en décharge, a une densité d'énergie volumique très élevée, un faible encombrement et

une bonne tenue en condition accidentelle. Ses principaux inconvénients sont des perspectives de baisse de coûts relativement faibles et une plage de fonctionnement restreinte en température. Les recherches doivent permettre de substituer à court terme les batteries NiMH par des technologies au Lithium. En comparaison, elles présentent à moyen terme des potentialités plus fortes en matière de densité d'énergie. L'élimination des principaux verrous doit conduire à une réduction des coûts, une augmentation de la durée de vie et de la fiabilité des composants. A court terme, les technologies privilégient les hydrures métalliques, le Lithium-ion et le Lithium-métal polymère, mais à plus long terme des recherches amont en matière d'électrolytes et de matériaux de cathodes et d'anodes sont attendues.

- En ce qui concerne les super condensateurs, dont les caractéristiques en font des éléments de puissance intéressants en utilisation sur les véhicules, les recherches devraient se focaliser sur les matériaux des composants et notamment les électrolytes, les électrodes ainsi que les techniques d'élaboration de films minces. Le cahier des charges des applications a les mêmes contraintes que celui des batteries : fiabilité, coût de fabrication, cyclabilité.

5.1.2.5 Marché

Les moyens de stockage à grande échelle sont soit à l'état de prototypes (électrochimie à circulation) ou d'étude (thermique avec réfractaires et turbine), soit réalisables en nombre très faible (hydraulique gravitaire et air comprimé en caverne).

Un marché important pour le stockage d'électricité concerne les applications professionnelles (balises, relais télécoms, etc.). Ce marché est dominé par les accumulateurs électrochimiques avec, principalement, le plomb et dans une moindre mesure le lithium-ion.

La qualité du courant et les alimentations ininterrompibles représentent aussi un marché significatif : les technologies les plus utilisées sont les super condensateurs et les accumulateurs électrochimiques (Pb et NiCd), il existe aussi quelques installations particulières avec des volants d'inertie.

Dans le domaine des énergies renouvelables, il y a un marché pour les applications photovoltaïques en sites isolées, marché qui est dominé par les batteries au Pb, voire NiCd ou NiZn (NiZn) pour des applications particulières.

Les marchés actuels du stockage moyenne/petite échelle sont donc dominés par les accumulateurs électrochimiques, essentiellement pour des raisons de coûts et de disponibilités de technologies.

5.1.2.6 Tissu industriel et effort actuel de R&D en France

Le tissu industriel national est dominé par les technologies électrochimiques avec des acteurs comme SAFT et ENERSYS qui réalisent leur production et leur recherche en France. Des filiales de grands groupes (BATSCAP EDF/BOLLORE) ou des PME sont également très actives sur des produits innovants (volants d'inertie, recyclage des matériaux d'électrodes pour les batteries...).

La France dispose de laboratoires publics de premier plan au niveau mondial dans le domaine du stockage électrochimique et des batteries. De même, au travers des différents organismes, elle dispose des savoir-faire technologiques dans l'automobile, l'électronique de puissance, les systèmes de charge et de comptage, etc.

5.1.2.7 Partenariats internationaux

Des laboratoires sont très actifs dans la participation à des projets européens (PCRD ou EIE).

Des travaux sont également menés dans le cadre du programme PVPS (solaire PV) de l'Agence Internationale de l'Energie.

5.1.2.8 Perspectives de R&D

En termes d'applications nouvelles, et dans le cadre des applications connectées aux réseaux, on pourrait envisager de stocker de l'électricité au niveau des réseaux de transport, au niveau des générateurs fluctuants ou au niveau des consommateurs :

- au niveau du réseau de transport : des stations de stockage à grande échelle, avec une répartition spatiale judicieuse, pourraient apporter des degrés de liberté supplémentaires aux gestionnaires de réseaux, voire permettre de reporter des renforcement de réseaux ;
- au niveau des générateurs fluctuants : cela pourrait permettre, pour l'éolien par exemple, de mieux valoriser la production dans une logique de marché libéralisé, voire de participer aux services systèmes (contrôle des puissances actives et réactives). A court terme, on peut noter toutefois qu'une répartition homogène dans l'espace des sources fluctuantes est suffisante pour lisser les fluctuations et qu'une compensation site par site n'est pas nécessaire ;
- au niveau des consommateurs (réseaux de distribution) : il y a un facteur 10 environ entre la puissance moyenne et la puissance crête appelées chez le consommateur, ce qui conduit à un surdimensionnement des réseaux de distribution. La valorisation du stockage à cette échelle (micros réseaux, habitat « zéro énergie ») pourrait être utile à condition de pouvoir le gérer à l'échelle du micro réseau.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Approches système	Développement de modèles physiques. Mise au point de logiciels de simulation. Etude de fortes pénétrations du stockage décentralisé. Valorisation de solutions hybrides associant plusieurs technologies de stockage (compatibilité ...)	CT CT MT MT
Amélioration des performances et baisse des coûts des accumulateurs électrochimiques	Diminution des coûts de fabrication et de possession. Augmentation de la durée de vie. Eco Conception et recyclage en fin de vie	CT CT CT
Développement de nouvelles technologies	Stockage thermique avec réfractaires et turbine pour des applications de forte puissance Volants d'inertie pour les applications décentralisées. Stockage hybride Chaîne électrolyseur/H ₂ /PAC	MT MT LT

Tableau 2 – Priorités de recherche stockage d'électricité

5.1.3 Nouveaux concepts pour les réseaux électriques

En Europe, les réseaux de transport et de distribution de l'électricité ont été conçus par des entreprises intégrées avec une vision centralisée. L'électricité est produite par des centrales de forte puissance dont la production est asservie en permanence aux besoins finaux des consommateurs. Cet ensemble (réseau + centrales) permet d'assurer la qualité et la sûreté de la fourniture d'électricité par la mise en commun des moyens et le respect d'une organisation rigoureuse entre les acteurs.

Dans un contexte en pleine évolution, il s'agit pour les distributeurs d'innover dans l'exploitation et la conception de leurs réseaux.

5.1.3.1 Contexte et état de l'art

Pour être acheminée depuis les centres de production vers les consommateurs, l'électricité emprunte des chemins successifs : le réseau de grand transport, destiné à véhiculer des quantités importantes d'électricité sur de longues distances puis le réseau de répartition, destiné à répartir sur de courtes distances l'électricité en quantité moindre. Ces réseaux ont recours à de très hautes tensions (HTB) afin de minimiser les pertes. Enfin, l'acheminement local est assuré en moyenne tension ou HTA (20 000 volts) et basse tension (400 volts et 230 volts) ou BT par les réseaux de distribution.

En France, la séparation entre les activités du distributeur et celles d'EDF Transport se situe aux points de raccordement des lignes HTB dans les quelques deux mille postes sources (transformation

HTB/HTA).

Les actifs des distributeurs intègrent ces « postes sources » ainsi que les lignes aériennes HTA ($3,7.10^5$ km) et BT ($1,2.10^5$ km nu & $3,1.10^5$ km torsadé), les liaisons souterraines HTA ($2,2.10^5$ km) et BT($2,2.10^5$ km), et les plus de 700 000 postes de distribution publique (transformation HTA /BT).

L'ensemble de ce réseau constitue un patrimoine important. Le réseau de distribution français a fait l'objet d'importants efforts de modernisation dans les années 90 avec la multiplication des postes sources permettant de réduire la longueur des départs, la mise en place de nombreux organes télécommandés sur les réseaux HTA ($>9.10^4$), etc..... Ces efforts ont permis de réduire la durée moyenne de coupure de plusieurs heures par an au début des années 80 à moins d'une heure aujourd'hui, ce qui permet au réseau français de bien se situer au niveau européen.

En matière de patrimoine réseau, la situation de nos voisins européens varie d'un pays à l'autre en fonction de l'histoire de chacun mais globalement leurs actifs sont plutôt plus anciens.

Avec une durée de vie importante et représentant des investissements considérables (plusieurs dizaines de milliards d'euros pour le réseau de distribution français), les réseaux doivent faire face à un environnement en pleine mutation caractérisé par :

- un possible renforcement de la place de l'énergie électrique dans la consommation finale (elle-même en réduction) avec en corollaire la nécessité d'assurer la robustesse vis-à-vis des événements climatiques ainsi qu'une qualité et une continuité de service adaptées ;
- une volonté politique de maîtriser la consommation d'énergie et de développer les énergies renouvelables (sachant que les réseaux de distribution n'ont pas été conçus pour accueillir massivement les énergies locales) ;
- des règles du jeu en pleine évolution avec la séparation et la multiplication des acteurs qui rend plus complexe la recherche des équilibres nécessaires au bon fonctionnement du système et plus difficile également la construction de visions de long terme.

5.1.3.2 Marché

Le chiffre d'affaires annuel du secteur de la distribution d'EDF représente plus du quart du chiffre d'affaires 2005 du groupe.

Le marché de la rénovation et de la réhabilitation du réseau européen est supérieur à quelques milliards d'euros par an et le marché mondial des protections de réseau se situe lui autour du milliard d'euros par an. Les évolutions prévues pour faire évoluer ces réseaux vers des réseaux intelligents devraient avoir des conséquences positives pour ce marché. Au-delà, c'est tout le marché de l'automatisation et du contrôle des réseaux qui peut profiter de ces perspectives.

Enfin, le développement en cours de compteurs communicants de nouvelle génération pour le marché de masse représente également un marché considérable au niveau européen : assurer le redéploiement des 34 millions de compteurs nécessaires pour le seul marché français représente un investissement de plusieurs Md€.

5.1.3.3 Tissu industriel et effort de R&D

Des compétences en matière de recherche existent dans le tissu universitaire français, laboratoire d'électrotechnique de Grenoble (LEG), Laboratoire d'électrotechnique de puissance de Lille, Ecole supérieure d'électricité,

A cela s'ajoute le GIE IDEA (Inventer la Distribution Electrique de l'Avenir) qui regroupe EDF, Schneider Electric et le LEG.

Dans le cadre des pôles de compétitivité le pôle grenoblois TENERDIS possède un programme dédié aux réseaux électriques de distribution.

Pour les fournisseurs de matériels et de services il faut citer Schneider Electric d'une part et Areva d'autre part. Ce dernier est particulièrement actif dans le domaine de l'automatisation et du contrôle des réseaux. Il faut également citer SIEMENS et ABB en Europe.

Dans le domaine des matériels ou équipement de réseaux, il faut aussi compter avec de constructeurs européens de taille plus modestes et spécialisés sur des créneaux particuliers à l'instar de l'espagnol ZIV ou du norvégien NORTROL.

Pour le développement de nouveaux compteurs communicants le marché français représente 34 millions d'unité et un investissement de plusieurs milliards d'euros. L'offre industrielle européenne n'est pas démunie avec Landis et Gyr, Actaris, Sagem, Stepper, Iskraemeco (Slovénie), ... mais aussi certains intégrateurs intéressés par les perspectives du marché à l'instar de SAP, Cap Gémini ou IBM,

5.1.3.4 Partenariats internationaux

Au niveau européen la France participe, à différents projets dans le domaine des réseaux électriques du VI^{ème} PCRD, comme FENIX avec IBERDROLA, RELIANCE avec Electrabel,... On peut citer comme partenaires les Pays Bas, l'Italie, la Suisse, l'Espagne, la Norvège et l'Allemagne.

La mise en place récente par la Commission européenne d'une plate forme technologique sur les réseaux intelligents, à laquelle participe la France, marque une première étape vers la reconnaissance du rôle actif que les réseaux de transport et de distribution seront conduits à jouer dans le système énergétique de demain au niveau international.

Outre Atlantique le programme Intelligrid porté par l'EPRI (institut de recherche américain financé par les compagnies électriques) mène les mêmes efforts de recherche. EDF participe à ces travaux.

5.1.3.5 Perspectives de R&D

L'objectif est de continuer à assurer la qualité de fourniture attendue, tout en minimisant les coûts dans un environnement plus complexe. De plus, au-delà d'un certain niveau de pénétration des énergies renouvelables intermittentes (éolien notamment), l'équilibre production consommation demandera plus qu'un simple asservissement de la production à l'évolution de la consommation.

Ainsi, les réseaux de demain devront donc être :

- flexibles pour répondre aux besoins de tous les clients et de la société en général ;
- accessibles pour permettre l'accès de tous notamment les sources renouvelables ou locales de grande efficacité tout comme aux moyens de production centralisés à faible niveau d'émission de CO₂ ;
- fiables pour assurer et améliorer la sécurité et la qualité de fourniture en adéquation avec les besoins d'une société de plus en plus numérisée ;
- économiques par la mise en œuvre d'innovations, et d'une gestion efficace de l'énergie de façon à contribuer au bon fonctionnement de la concurrence et de la régulation.

Compte tenu de la lourdeur des investissements sur les infrastructures de réseaux et la durée de vie importante des actifs qui les composent, les réseaux évoluent de façon très progressive. Dans leurs ossatures générales les réseaux de demain seront donc probablement assez proches de ceux que nous connaissons aujourd'hui.

Au niveau des acteurs, il s'agit d'assurer un basculement entre des avancées portées historiquement par les technologies du monde de l'électrotechnique de réseau, avec des technologies nées ailleurs dont la distribution doit s'emparer grâce à : la baisse des coûts des technologies de l'information, le développement de nouveaux capteurs, l'émergence de moyens de productions locaux renouvelables ou pas, l'apparition de nouvelles capacités pour le pilotage et la maîtrise de la consommation, le développement du stockage... .

Par ailleurs un axe de recherche consistant à réduire les pertes dues au transport et à la distribution de l'énergie, devra être développé. Ces pertes sont estimées aujourd'hui à 10 % de la production totale.

Les recherches devront être menées sur les nouveaux matériaux permettant le transport sans émission de chaleur et avec un poids, un encombrement et un coût compatibles avec les infrastructures.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Evolution des architectures électriques	Développement de nouveaux concepts autour des infrastructures existantes	CT
	Automatisation de l'exploitation avec gestion de plus en plus de complexités (EnR, services, ...)	MT
	Prise en compte des possibilités de stockage	MT
Pénétration des énergies locales	Développement d'interface d'intégration des EnR dans le réseau ou dans le bâti Réalisation de système d'information permettant l'interopérabilité et la coordination Résoudre les problèmes : - de congestion d'ouvrage - de qualité de tension - de puissance de court circuit - de réserve tournante - de stabilité	MT / LT
Déploiement de compteurs interactifs, intelligents et communicants	Télé relevé	Actuel / CT*
	Télé gestion	
	Détection de défaut basse tension	CT
	Communication Nouveaux services (électricité verte,...)	CT
Réduction des pertes	Supra conducteurs	MT
	Développement de nouveaux matériaux	LT

Tableau 3 – Priorités de recherche réseaux électriques

*dans la perspective des échéances d'ouverture totale des marchés en 2007

5.1.4 Hydrogène et piles à combustible

L'hydrogène énergie est un vecteur énergétique et un combustible de choix pour la pile à combustible (PAC) qui, alimentée en hydrogène et oxygène, produit de façon continue de l'énergie électrique et de la chaleur, en ne rejetant que de l'eau, avec un rendement de conversion électrochimique élevé.

C'est une technologie de rupture² qui peut concurrencer des technologies existantes sur deux marchés majeurs : la production d'électricité et les transports.

Son déploiement induirait des substitutions radicales de produits et de process. Le rythme, voire l'issue de son développement, sont encore empreints de fortes incertitudes malgré l'intensité des travaux de recherche.

5.1.4.1 Etat de l'art

Le Tableau 5 présente l'état de l'art des technologies de piles à combustible.

L'hydrogène peut être produit de plusieurs façons : l'action de la vapeur sur le carbone à haute température, le craquage des hydrocarbures par la chaleur, l'action de la soude ou de la potasse sur l'aluminium, l'électrolyse de l'eau ou par son déplacement depuis les acides par certains métaux. Certains microorganismes (microalgues, cyanobactéries et bactéries) sont également capables de produire de l'hydrogène, à partir de l'énergie solaire ou de la biomasse. La production d'hydrogène à partir de la biomasse fait l'objet de plusieurs projets de recherche financés par l'ANR.

L'hydrogène brut disponible dans le commerce est généralement fabriqué par reformage du gaz naturel (48 %) ou d'hydrocarbures liquides (18 %) et par gazéification du charbon (18%) Ces technologies, qui sont aujourd'hui les plus utilisées, ont le gros inconvénient de produire du gaz

² Contrairement à une innovation technologique incrémentale, une innovation basée sur une technologie de rupture implique que les méthodes aussi bien que les matériels utilisés soient nouveaux.

carbonique qui est un gaz à effet de serre. Il faudra soit développer de nouvelles technologies non émettrices soit coupler les actuelles au captage et au stockage du CO₂.

Description	Electrolyte	Ions mis en œuvre	Gaz à l'anode	Gaz à la cathode	Puissance	Temp. de fonctionnement °C	Rendement électrique	Maturité ³
AFC – Alcaline Fuel Cell	Hydroxyde de potassium	OH –	hydrogène	oxygène	10 à 100 kW	jusqu'à 80	Stack: 60–70 % Système: 62 %	C / D
PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Membrane polymère	H +	hydrogène	oxygène	0,1 à 500 kW	70–200	Stack: 50–70 % Système: 30–50 %	C / D
DMFC – Direct Methanol Fuel Cell	Membrane polymère	H +	méthanol	oxygène	mW à 100 kW	90–120	Stack: 20–30 %	C / D
PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell	Acide phosphorique	H +	hydrogène	oxygène	jusqu'à 10 MW	environ 200	Stack: 55 % Système : 40 %	D
MCFC – Molten Carbonate Fuel Cell	Carbonate de métaux alcalins	CO ₃ ²⁻	hydrogène Méthane, Gaz synthèse	oxygène	jusqu'à 100 MW	environ 650	Stack: 55 % Système : 47 %	D / début C
SOFC – Solid Oxide Fuel Cell	Céramique	O ₂ –	hydrogène Méthane, Gaz synthèse	oxygène	jusqu'à 100 MW	800–1000	Stack : 60–65 % Système: 55–60 %	D

Tableau 4 – Etat des l'art des technologies de piles à combustible

³ C : commercialisé ; D: développement

5.1.4.2 Marché

L'hydrogène est avant tout un produit chimique. La production mondiale totale d'hydrogène s'élevait en 2001 à 540 milliards de m³. Si cet hydrogène était employé comme vecteur énergétique cette quantité ne représenterait que 140 Mtep soit environ 1,5 % de la consommation mondiale en énergie.

Ses principaux marchés sont la production d'ammoniac (51 %), le raffinage* (45 %), la chimie (3%) et enfin les autres utilisations – énergie, industrie du verre, traitement thermique par exemple. Cependant la majeure partie de la production mondiale est auto produite et auto consommée par les industriels et n'apparaît donc pas sur le marché qu'alimentent les grands producteurs de gaz industriels. L'hydrogène qui se négocie sur ce marché représente seulement 3,65 % de la production mondiale.

- Il est à noter les besoins croissants des raffineries (désulfuration, traitement des bruts lourds, production de carburants de synthèse de type XtL).

La consommation actuelle de l'hydrogène comme vecteur énergétique est encore très faible et ne concerne que quelques projets de démonstration de véhicules urbains et quelques projets de production d'électricité stationnaire par PAC.

Concernant les PAC, le marché du stationnaire ou du transport n'en est, actuellement, qu'au niveau des démonstrateurs. Une étude récente de l'AIE (2006) montre qu'en 2050, si toutes les conditions optimum pour l'avènement de l'économie hydrogène étaient mises en place, seulement 30 % des véhicules rouleraient avec une pile à combustible, ce qui représenterait 13 % de la demande globale en pétrole, soit 5 % de la demande totale en énergie primaire. En tout état de cause, un marché significatif industriellement pour l'automobile n'est pas envisageable avant l'horizon 2020.

La production d'électricité à partir de PAC a des perspectives à moyen terme. Dans le cas de la France la micro-cogénération à partir de PAC ne semble pas avoir un marché à court ou moyen terme du fait que les chaudières haut de gamme actuelles ont un très bon rendement et que les PAC seraient dans ce cas alimentées au gaz naturel.

Une des rares applications réellement industrielles de l'hydrogène énergie est la propulsion spatiale.

5.1.4.3 Tissu industriel et efforts de R&D

En France

Un des leaders mondiaux de la production d'hydrogène, en tant que produit chimique, est Air Liquide.

Mais l'hydrogène et la pile à combustible sont susceptibles d'occuper une place importante dans la stratégie de plusieurs grandes entreprises françaises : constructeurs automobiles, Total, Air liquide, GDF, AREVA. Pour les utilisations embarquées, les constructeurs automobiles français investissent dans des solutions avec réformeur ou, pour le plus long terme, à l'hydrogène direct. Les offreurs de services énergétiques (EDF, GDF et Dalkia) s'intéressent aux applications stationnaires, généralement en les couplant aux solutions à base de gaz naturel (l'hydrogène, produit in-situ, n'est alors pas nécessaire en tant que vecteur énergétique). Bien que partis avec un certain retard, les industriels français, en partenariat avec les laboratoires publics, devraient avoir la possibilité de se positionner lorsque le marché des piles à combustible démarrera réellement.

La filière française des PAC basse température n'est encore qu'émergente avec la création d'Axane (Air Liquide) et d'Hélion (AREVA). Ces deux sociétés travaillent sur la technologie PEMFC et se positionnent actuellement sur des marchés de niches.

Des compétences en matière de recherche existent dans les laboratoires du CNRS et surtout au CEA.

De plus, un groupe de travail, coordonné par le Ministère délégué à la Recherche a réuni en 2004 les acteurs français de la recherche publique et de l'industrie dans ce domaine. Les travaux ont abouti à un texte collectif synthétique d'un plan d'action national pluriannuel (2005-2010) sur l'hydrogène et les piles à combustible (PAN-H), qui a pour ambition de construire un programme français de recherche et d'innovation à finalité économique et industrielle en développant les éléments clés d'une filière technologique incluant la production « propre », le transport, la distribution et le stockage de l'hydrogène, de même que son utilisation préférentielle dans une pile à combustible de type PEMFC.

L'usage final automobile étant la cible privilégiée à long terme, mais les marchés précoces moins exigeants à plus court terme, qui prépareront le marché automobile (applications stationnaires, résidentielles, tertiaires ; transports collectifs...), entrent également dans le champ de PAN-H.

Les premiers projets du volet R&D (recherche et développement) de PAN-H ont été cofinancés par l'Agence nationale de la recherche (ANR), à l'occasion des appels à projets de 2005 et 2006. Des projets de démonstration devront permettre de valider les technologies à développer.

Dans le monde

Au niveau mondial, selon l'AIE, les dépenses publiques annuelles de recherche et développement sont estimées à plus de 850 M€, l'effort de R&D dans le secteur privé s'élevant à plus de 3,4 G€.

Des coopérations internationales se mettent en place depuis 2003 avec la création d'un groupe de coordination sur l'hydrogène (HCG) à l'Agence Internationale de l'Energie (AIE).

Les Etats-Unis ont établi une « roadmap » de l'hydrogène. Le gouvernement fédéral américain a décidé d'affecter 1 G€ entre 2004 et 2008 (initiative sur l'hydrogène et programme « FreedomCAR »).

Le Japon a triplé son budget de RD&D sur l'hydrogène depuis 2001 avec un budget du METI de 252 M€ en 2005. Des projets de démonstration sont en cours : 10 stations-service à hydrogène dans la région de Tokyo, environ 50 véhicules à pile à combustible, une centaine de piles à combustible stationnaires de 1 kW... .

La Chine a attribué un budget de 72 M€ au développement de véhicules à pile à combustible, avec l'objectif de produire des véhicules à prix compétitifs à partir de 2020.

Le 6^{ème} programme cadre de l'Union Européenne (PCRD) (2002-2006) a prévu un budget de 275 M€ (55 M€/an) pour les différentes activités de R&D (recherche et développement). Actuellement le 7^{ème} PCRD est en préparation avec la perspective de lancer une JTI (Joint Technology Initiative) pilotée par l'industrie, qui combinerait des financements européens, nationaux et privés pour des projets de R&D et de déploiement de grande envergure.

5.1.4.4 Partenariats internationaux

Au niveau européen la France fait partie de la plate-forme technologique européenne sur l'hydrogène et a des projets soutenus dans le cadre du VI^{ème} PCRD.

Au niveau international, elle participe au partenariat sur l'économie de l'hydrogène (IPHE) pour étudier les questions d'intérêt commun et les obstacles concernant l'économie de l'hydrogène, programme lancé en 2003 sous l'impulsion des États-Unis avec la participation de 15 pays et de la Commission européenne. Elle fait aussi partie du groupe de travail de l'AIE sur l'hydrogène « HCG ».

La France est partenaire de tous les grands pays leaders dans ce domaine.

5.1.4.5 Perspectives de R&D

Les acteurs de la recherche en France ont défini dans le rapport PAN-H les actions prioritaires en matière de recherche à mener à court terme ou long terme, sur les PAC et en matière de production d'hydrogène (Tableau).

Ces feuilles de route sont conformes à celles qui sont élaborées dans les forums de coopération internationale et sont d'ores et déjà mises à profit pour les financements existants de l'Agence Nationale de la Recherche.

Objectifs de R&D	Travaux	Horizon
H2		
Fabrication	Reformeurs au gaz naturel pour station service	CT
	Réacteurs de gazéification et reformage de la biomasse (oxydation partielle en présence d'eau)	MT
	Electrolyseurs couplés à des sources EnR	MT
	Electrolyse à haute pression	LT
	Cycles thermochimiques de la dissociation de l'eau à haute	

	température (génération IV, solaire à concentration) Photochimique ou photobiologique	LT LT
Stockage	Nouveaux matériaux Nouveaux concepts	MT LT
Transport	Pipeline dédié ou Adapter le réseau existant de gaz naturel Sécurité	LT MT MT
PAC		
Approvisionnement d'hydrogène (transport, distribution, stockage embarqué)	Réseaux de distribution d'hydrogène en matériaux polymères. Démonstration de véhicules de flotte captive, avec logistique d'approvisionnement en hydrogène, stockage d'hydrogène en station-service, réglementation applicable, sécurité à toutes les étapes et acceptation par le public. Stockage d'hydrogène sous forme solide, dans un cadre valorisant pour attirer les meilleures équipes françaises.	MT CT CT
Pile à combustible (PEMFC)	Elaboration d'une feuille de route technologique (2006-2010) sur les matériaux de la pile PEMFC (membrane, catalyseurs, assemblage membrane/électrodes), visant à réduire les coûts et à améliorer la fiabilité, la durabilité et le recyclage des matériaux. Programme mobilisateur sur les membranes polymères, dans un cadre valorisant pour attirer les meilleures équipes françaises. Programme mobilisateur sur les catalyseurs, dans un cadre valorisant pour attirer les meilleures équipes françaises.	CT MT MT
Pile à oxyde solide SOFC	Matériaux pour électrolyte solide Tenue en température des composants Diminution du temps de démarrage	MT LT LT
Pile à membrane céramique protonique PCFC	Développement de matériaux céramiques conducteurs protoniques Recherches sur les interfaces électrode/électrolyte	LT MT
Actions transverses	Analyses de risque et de sécurité, actions de formation, études d'acceptabilité sociale. Etude de la réglementation applicable aux technologies de l'hydrogène, dans un cadre interministériel, afin de proposer des voies d'amélioration cohérentes avec le développement des applications de l'hydrogène énergie	MT MT

Tableau 5 – priorités de recherche pour la production d'hydrogène et des PAC

5.1.5 Transports terrestres

Le secteur des transports consomme une part croissante de l'énergie (31% en 2005 en France contre 20% en 1974). Secteur presque totalement dépendant des produits pétroliers, il constitue la première cause de dépendance énergétique extérieure (65% de la consommation en 2004 contre 34% en 1974) et la principale source d'émission de gaz à effet de serre (26% en 2001, source qui croît également plus rapidement que les autres secteurs : + 21% entre 1990 et 2001).

Des avancées multiples sont certes intervenues, sous l'effet notamment des normes européennes, surtout dans le domaine des émissions de polluants locaux ayant un impact sur la santé (oxyde de carbone, oxydes d'azote, dioxyde de soufre) qui ont été divisées par trois en dix ans. En ce qui concerne les émissions spécifiques des diesels, particulièrement préoccupantes parce que ces motorisations sont en très forte croissance (50% du parc en 2005 contre 7,7% en 1985), des solutions

efficaces comme les filtres à particules sont apparues sur le marché et leur généralisation est en cours. La consommation unitaire a été également sensiblement réduite, notamment grâce à l'arrivée de l'injection directe diesel.

Toutefois d'importants progrès restent à faire dans le domaine de la réduction de la consommation et de ses conséquences en terme de dépendance pétrolière, en intégrant avec plus de rigueur la notion d'usages réels dans les évaluations comme dans les essais. La maîtrise des émissions de gaz à effet de serre est également aujourd'hui une priorité indiscutable. On notera que cet objectif ne fait pas encore l'objet de normes européennes, mais d'un engagement volontaire des constructeurs européens réunis au sein de l'ACEA, de limiter à 140 g par km les émissions de CO₂ moyennes des véhicules neufs en 2008. On notera également que l'effet de ces efforts est limité par le fait que l'âge moyen du parc automobile est passé de 6 ans en 1985 à 7,5 en 2004, probablement en raison de la progression de la bi-motorisation (deux voitures par ménage). Enfin, les véhicules utilitaires, deux roues et autres engins motorisés qui n'ont pas progressé autant que l'automobile devront relever les mêmes défis.

Depuis 1990 un programme de recherche, d'expérimentation et d'innovation dans les transports terrestres, - le PREDIT- stimule la coopération entre secteur public et privé pour favoriser l'émergence de systèmes de transport économiquement et socialement plus efficaces, plus sûrs, plus économes en énergie et finalement mieux respectueux de l'homme et de son environnement. L'action incitative du PREDIT, déjà conséquente dans le domaine énergie-environnement, s'est trouvée encore soutenue et renforcée à partir de 2004 par les plans Véhicule propre et économe (VPE) du 15 septembre 2003 et Climat 2004.

5.1.5.1 Objectifs de recherche

C'est un des trois objectifs majeurs du PREDIT 3 (2002-2007) que de réduire les impacts environnementaux et de contribuer à lutter contre l'effet de serre. Globalement, les enjeux énergétiques et environnementaux ont pris une place majeure en terme d'orientation de l'ensemble des actions de ce programme comme de moyens attribués aux projets qui leurs sont directement rattachés. Et ceci est vrai tant sur le plan des connaissances que sur celui des technologies : avec une vision à moyen terme, le PREDIT aide, en effet, à la fois la production de connaissance, pour les politiques publiques ou pré-compétitives, la réalisation de démonstration et d'expérimentations, des évaluations et études comparatives.

Parmi les thèmes d'action du programme, trois se rapportent très directement aux enjeux énergétiques.

5.1.5.2 L'amélioration du système carburant - combustion - dépollution

Les moteurs thermiques assurent plus de 99% de la motorisation des véhicules routiers. Cette situation n'étant pas amenée à évoluer sensiblement avant 2015, les enjeux associés aux moteurs thermiques sont donc considérables. Il faudra travailler à la fois sur l'amélioration des techniques et solutions existantes et sur le développement des innovations. Ce thème comprend :

- l'amélioration des procédés classiques de combustion, avec d'une part les améliorations des systèmes d'injection haute pression et les lois de contrôle adaptées, les nouvelles solutions de distribution ;
- les nouveaux procédés de combustion (HCCI et CAI) qui font l'objet de recherches au niveau européen et sont très porteurs en terme de réduction de CO₂ ;
- les nouveaux carburants et l'adaptation interactive « combustion-carburant », avec la recherche de motorisation dédiée (gaz naturel, DME, ...) et une orientation vers les carburants « renouvelables »
- la dépollution et le contrôle moteur avec une orientation forte sur la réduction des NOx et des particules.

5.1.5.3 Le développement de la motricité électrique et hybride

La motricité électrique, totale ou partielle (hybride), apparaît comme une des voies permettant d'optimiser au mieux la demande énergétique pour la plupart des véhicules amenés à circuler à temps

complet ou partiellement en zones urbaines et périurbaines.

Des premières analyses menées précédemment ayant mis en évidence la multiplicité des solutions potentielles en terme d'architecture véhicule, il a paru préférable d'orienter l'action vers deux axes : études de fonctionnalités et d'usages, et recherches sur les composants et systèmes.

- *Etudes de fonctionnalités et d'usages* : il s'agit d'examiner les développements « électriques » à bord des véhicules (assistance de direction, freinage, autres commandes «X by wire»...) puis d'identifier les usages spécifiques selon les besoins des utilisateurs (transport de marchandises, particulier, flottes captives, transports collectifs, ...) et selon les contraintes (possibilité de recharge, normes actuelles et futures – bruit, émissions, ...).
- *Recherche sur les composants et systèmes* : les travaux portent sur le développement des connaissances spécifiques, y compris la motorisation. Les actions visent principalement :
 - les architectures de commande ;
 - la gestion de l'énergie ;
 - la chaîne de traction ;
 - le stockage (batteries, super capacités, ...) et les interfaces ;
 - les équipements transversaux et associés aux systèmes électriques.

5.1.5.4 Le développement de l'électronique de puissance

Afin de permettre une utilisation grandissante et optimisée de l'énergie électrique à bord des véhicules terrestres de tous types, les composants électroniques de puissance doivent être développés au niveau industriel avec un objectif de compétitivité élevé sur les plans techniques, technologiques et économiques.

Alors que les briques de base existent, leur emploi généralisé dans les transports constitue un véritable saut technologique majeur en terme de durée de vie, de fiabilité et de coût.

Les champs scientifiques et techniques à traiter concernent entre autres :

- l'architecture des convertisseurs de puissance ;
- la compatibilité électromagnétique rapprochée ;
- la technique de refroidissement ;
- l'élargissement du domaine de fonctionnement en température élevée, au-delà de 125°C ;
- le contrôle commande intégré ;
- la possibilité d'intégrer les fonctions numériques ;
- l'évaluation des durées de vie et les techniques de fiabilisation ;
- la modularité des composants pour réduire les coûts par effet de série.

5.1.5.5 Bilan de recherches engagées

A la fin des trois premières années du PREDIT 3 (2002-2004), le domaine énergie-environnement avait bénéficié de près de la moitié des soutiens publics. Les thèmes de recherche concernant plus particulièrement les objectifs énergétiques regroupaient plus des deux tiers des projets et du financement du domaine énergie-environnement. .

Axes thématiques	Principaux thèmes visés
Systèmes Carburant / combustion/ dépollution	amélioration des procédés classiques de combustion nouveaux procédés de combustion nouveaux carburants et adaptation interactive « combustion-carburant » dépollution et contrôle moteur

Gestion de l'énergie et pénétration de l'électricité à bord du véhicule	<p>Motricité électrique et hybride :</p> <ul style="list-style-type: none"> · architectures de commande · gestion de l'énergie · chaîne de traction · stockage (batteries, super capacités...) et les interfaces · équipements transversaux et associés aux systèmes électriques <p>Composants d'électroniques de puissance :</p> <ul style="list-style-type: none"> · élargissement du domaine de fonctionnement en température élevée (> 125°C) · évaluation des durées de vie et les techniques de fiabilisation · modularité des composants pour réduire les coûts par effet de série
Consommation des auxiliaires	<p>efficacité énergétique de la climatisation automobile</p> <p>étanchéité (HFC) des circuits de climatisation automobile</p> <p>équipement de chauffage additionnel pour véhicules</p>
Deux-roues et petits véhicules	actions nécessaires afin de réduire la pollution, la consommation, le bruit et améliorer la sécurité.
Effet de serre et énergie	<p>réalisation d'un état des lieux critique sur l'état actuel des connaissances en matière d'émissions unitaires</p> <p>confrontation des approches « du puits à la décharge »</p> <p>connaissances des émissions réelles actuelles de certains véhicules ou postes particuliers</p> <p>état des lieux des mesures envisagées par les chercheurs et les politiques pour maîtriser les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur des transports</p> <p>constitution de base d'indicateurs pour l'évaluation « circulation-effet de serre » de l'action locale et développement de méthodologies d'évaluation environnementale de politiques locales ou régionales</p> <p>place de la consommation de carburants dans les critères de choix des véhicules</p> <p>les marges de manœuvre et les contraintes sur l'évolution des émissions unitaires des véhicules</p>

Tableau 6-. Thèmes de recherche « énergie » du PREDIT3 (2002-2004)

La majorité des projets technologiques, avec 39% des crédits attribués, concerne l'amélioration des moteurs à combustion interne : rendement, dépollution, adaptation aux carburants alternatifs. Le second thème en pointe, pour 31% des financements, porte sur la pénétration de l'énergie électrique : stockage, gestion, électronique de puissance (en notant que les recherches sur la pile à combustible ne sont pas dans le périmètre du PREDIT).

La limitation des nuisances et des impacts environnementaux de la pollution liée aux transports sous-tend également des actions dans d'autres domaines du PREDIT relatifs à la mobilité des voyageurs, au transport de marchandises (évaluation des émissions de gaz à effet de serre par les chaînes logistiques, par exemple), à l'évaluation des politiques de transport et à la prospective (scénarios à l'horizon 2030 et 2050).

5.1.5.6 Le Plan véhicules propres et économes (VPE)

- Le plan « véhicule propre » visait à impulser un certain nombre de mesures incitatives et un renforcement de la recherche sur des briques technologiques identifiées dans le PREDIT et dans le réseau PACO (Réseau de recherche et d'innovation technologique sur la pile à combustible). Le programme R&D de ce plan de 40 M€ (2004-2005) avait comme perspective des bénéfices environnementaux importants par rapport aux technologies de 2003.

Moteur, carburant, dépollution	- 10% à 20% CO ₂
Pénétration de l'énergie électrique	- 5% à 30% CO ₂
Consommation des auxiliaires	- 3% CO ₂ et élimination HFC
Réduction du bruit	- 6 dB
Technologie pile à combustible (transport seul)	- 30% à 40% CO ₂
Démonstrateurs transports urbains et de marchandises	

Tableau 7 - objectifs du plan véhicules propres et économes

- Par ailleurs, dans le cadre du PREDIT et du plan VPE, et afin de bien tenir compte des objectifs plutôt à court terme de ce plan (compétitivité industrielle française à l'horizon 2010-2013), un groupe d'industriels de l'automobile a travaillé à préciser les priorités propres des constructeurs et des équipementiers.

Technologie	Niveau de priorité 1	Niveau de priorité 2
Moteur	Injection directe stratifiée	Systèmes de distribution variables ou pilotés, et taux de compression variables
	Auto-inflammation contrôlée	Downsizing et suralimentation
	Combustion homogène	
	Capteurs spécifiques et contrôles en boucle fermée	
Post-traitement	DeNOx	Élimination des particules
Carburants alternatifs	Carburants issus de la biomasse	Gaz naturel
Hybrides	Électronique de puissance et tensions de fonctionnement	Intégration des machines électriques dans la transmission
	Stockage	Gestion thermique Adaptation des actionneurs traditionnels
Climatisation au CO ₂		Fuite et compatibilité avec hybrides

Tableau 8 – Priorités de recherche des constructeurs et équipementiers

Ces priorités ont été prises en compte dans l'appel à propositions PREDIT lancé début 2005 au titre du plan VPE

En outre le plan VPE a créé une commission interministérielle (Civepe) qui réfléchit à la mise en œuvre de nouvelles mesures visant au développement de véhicules propres. Parallèlement a été mis en place un Groupement Interministériel (GIMVE) qui travaille pour le développement des véhicules électriques.

5.1.5.7 Perspectives de R&D

L'activité du PREDIT dans ce domaine se poursuivra jusqu'en 2007 inclus, terme de l'actuel programme 2002-2007, et en association avec l'Agence Nationale de Recherche (ANR). Ce programme fera l'objet, en 2007, d'un bilan, d'une évaluation, et de propositions pour un nouveau programme quinquennal qui pourrait être lancé, si le gouvernement l'approuve, à l'occasion du Carrefour final du PREDIT 3, prévu au 1^{er} semestre 2008.

Pour ce qui concerne les recherches technologiques, elles devraient s'inscrire dans la vision suivante :

- pour la période allant jusqu'à 2015-2020, une amélioration sensible des moteurs existants, accompagnée par une forte augmentation des carburants issus de la biomasse et un développement des motorisations hybrides voire électriques ;
- pour la période allant de 2025 à 2050, un équilibrage des énergies fossiles (issues de la biomasse et électriques), avec une introduction progressive de l'hydrogène via la pile à combustible.

Parallèlement à cette poursuite évidente des recherches technologiques, il apparaît d'ores et déjà que

l'acceptabilité, par la population et les acteurs économiques, des mesures envisagées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) des transports doit être étudiée de façon plus approfondie. Cette acceptation peut devenir particulièrement critique au regard de réductions importantes des émissions, telles que leur division par 4 à l'horizon 2050, comme annoncé par le président de la République, objectif qui exigera à coup sûr une modification des modes de vie et de consommation. Pour faciliter cette acceptation, il s'agira non pas d'examiner ce problème de manière générale en terme de sensibilisation à la question de l'effet de serre, mais d'analyser précisément, sur des mesures envisagées sur tel ou tel site (par exemple les villes du réseau européen « Civitas »), comment se noue le débat public, quels sont les arguments échangés, quelles synergies peuvent apparaître entre des objectifs distincts comme la sécurité, le bruit ou l'effet de serre.

Ainsi les grandes catégories de questions suivantes devront probablement être traitées :

- comment favoriser un report massif vers les transports collectifs ?
- comment rendre plus attractifs les modes doux (pédestre, vélo, voire roller) dans la ville ?
- quelles limitations des usages de l'automobile pourront être imposées ?
- un urbanisme des courtes distances est-il possible, et comment rapprocher habitat et travail ?
- faudra-t-il, et si oui comment, contenir la croissance de la mobilité ?
- comment basculer vers une économie des transports qui ne dépende plus du pétrole ?

5.1.6 Bâtiment

Le secteur du bâtiment représente 46% (70 Mtep) de la consommation finale d'énergie et 23% des émissions de gaz à effet de serre (en incluant le chauffage urbain). Cette consommation se répartit pour environ 2/3 pour le résidentiel et 1/3 pour le secteur tertiaire et se subdivise en 49 Mtep pour le chauffage et 21 Mtep pour les autres besoins (eau chaude sanitaire ; cuisson ; éclairage domestique ; climatisation notamment pour le tertiaire).

Amplifiant et développant les actions initiées dans le cadre de « Bâtiment 2010 » (Ademe), le « programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans les bâtiments » (PREBAT), mis en place en 2004 – 2005, vise à apporter des solutions nouvelles aux défis énergétiques dans le bâtiment par un effort important, durable et finalisé de recherche, de développement, d'innovation et de transfert de technologie.

5.1.6.1 Actions de recherche en cours

A l'horizon 2020 l'objectif est de réduire les consommations énergétiques des bâtiments neufs de 40% par rapport aux consommations des constructions actuelles. A l'horizon 2050, c'est le bâtiment à énergie positive qui est visé. Le bâtiment peut, en effet, être un lieu de production d'énergie décentralisée utilisant les énergies renouvelables (vent, soleil, géothermie superficielle, biomasse...).

De façon générale, le programme de recherche PREBAT en cours, qui canalise l'essentiel de l'effort de recherche sur la maîtrise de l'énergie dans le bâtiment, s'inscrit à l'horizon 2050 pour les finalités suivantes :

5.1.6.1.1 La modernisation durable des bâtiments existants.

L'objectif de recherche et de développement poursuivi est d'obtenir, à l'horizon 2015-2020, dans des conditions techniques, économiques et sociales acceptables, des solutions techniques permettant :

- la rénovation banalisée de bâtiments avec une performance énergétique aussi proche que possible de celle des bâtiments neufs. L'objectif minimum sera une consommation énergétique pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, le renouvellement d'air et le confort d'été inférieure à 80 kWh/m²/an et un temps de retour sur investissement inférieur à 15 ans au coût des énergies à cet horizon.

- la réhabilitation de bâtiments pouvant atteindre, par leur adaptation à l'architecture et au bâti existant, des performances équivalentes à celles obtenues par les meilleures pratiques actuelles de constructions neuves.

L'objectif final d'une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre en 2050 doit être atteint par la réalisation de ces objectifs de recherche dans la mise à niveau du parc immobilier restant.

L'objectif du programme PREBAT 2005-2009 est de pouvoir disposer en 2010 d'un ensemble de solutions techniques permettant de mettre à disposition des bâtiments réhabilités avec une consommation maximale de chauffage de 50 kWh/m² et un temps de retour sur investissement inférieur à 20 ans.

5.1.6.1.2 La préfiguration des bâtiments neufs de demain.

L'objectif de recherche et de développement poursuivi est de permettre à l'horizon 2015-2020 la construction banalisée de bâtiments de tous types consommant pour le chauffage, le confort d'été, la production d'eau chaude, le renouvellement d'air et l'éclairage, moins de 50 kWh/m²/an avec un temps de retour sur investissement inférieur à 15 ans au coût des énergies à cet horizon.

L'objectif du programme PREBAT 2005-2009 est de pouvoir disposer en 2010 d'un ensemble de solutions techniques permettant de lancer la réalisation de bâtiments démonstrateurs avec une consommation nulle et un temps de retour sur investissement inférieur à 20 ans.

5.1.6.1.3 Les bâtiments à énergie positive.

L'objectif de recherche et de développement poursuivi est de pouvoir construire et 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 l'ensemble de ces recherches, une attention particulière est portée aux conditions de confort et de santé, ainsi qu'à l'intégration des énergies renouvelables. Les recherches sont parallèlement déclinées dans le domaine des sciences sociales et humaines pour 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.

La nature du secteur du bâtiment impliquant de vérifier en grandeur réelle la faisabilité et l'efficacité des solutions techniques proposées par la recherche, des réalisations expérimentales et de démonstration seront initiées en liaison étroite avec les milieux professionnels concernés et les différents maîtres d'ouvrage notamment les collectivités territoriales.

Le PREBAT recherche et favorise tous les partenariats susceptibles de développer les recherches et les expérimentations en matière de bâtiment, notamment avec :

- le programme « solaire photovoltaïque » mis en place en 2005 et financé par l'ANR ;
- les actions de la fondation « Bâtiment et énergie » sur l'évolution des matériaux, l'isolation thermique, la ventilation, l'efficacité des systèmes de chauffage et de refroidissement, l'utilisation des énergies nouvelles renouvelables.

Le PREBAT représente un cadre national d'action de la recherche pour le bâtiment. Il doit permettre de positionner la France comme un acteur important de la préparation et de la mise en œuvre du 7^{ème} PCRD, notamment en relation avec les travaux menés dans le cadre de la « plate forme technologique européenne de la construction ». C'est pourquoi le PREBAT veille à articuler ses ambitions et ses thématiques avec celles de l'espace européen de la recherche.

Globalement la France n'est pas en retard sur l'étranger en matière d'innovations pour les économies d'énergie et la qualité environnementale dans les bâtiments. De nombreux pays n'ont pas de mouvement équivalent à celui de la Haute Qualité Environnementale et n'ont pas décidé de dédier un programme de R & D aux économies d'énergie dans le bâtiment. Mais certains pays, comme la Suisse et l'Allemagne, et dans une certaine mesure les Etats-Unis, ont une avance de l'ordre de 5 à 15 ans en matière de diffusion de bâtiments énergétiquement très performants.

5.1.6.2 Tissu industriel et scientifique

Un travail préparatoire à la mise en place du programme PREBAT⁴ avait permis de recenser les principales équipes de recherche actives en France sur le thème de l'efficacité énergétique des bâtiments, équipes regroupant au total environ 500 chercheurs :

- CEA (nouvelles technologies de l'énergie et composants technologiques),
- CSTB (production locale, isolation, automatismes, aide à la conception),
- CNRS (programme Energie mis en place en 2002 sur l'habitat primaire et tertiaire, l'énergie solaire thermique, la gestion du froid et de la chaleur, les composants photovoltaïques, la socio-économie de l'énergie, la pile à combustible, la distribution et le stockage de l'énergie),
- Gaz de France (systèmes énergétiques, services énergétiques),
- EDF (technologies, socio-économie, intégration),
- Ecoles d'Architecture (énergétique du bâtiment),
- Université de La Rochelle (qualité des ambiances habitables, systèmes intelligents),
- ENTPE (conception globale, modélisation et simulation, façades actives, ventilation et qualité de l'air),
- COSTIC (production décentralisée d'énergie renouvelable, régulation et ventilation, réhabilitation des bâtiments),
- Ecole des Mines de Paris (modélisation, métrologie, impact environnemental),

ainsi que, avec de plus petites équipes sur ce thème, CTBA, CETIAT, ARCELOR, BRGM,...

Cependant la part du travail effectivement consacré par ces équipes au thème de l'efficacité énergétique des bâtiments n'est pas connue et est difficilement estimable.

Des conseils régionaux ont lancé des appels à projet pour des bâtiments neufs et rénovés à basse consommation, des municipalités mettent en place une politique de maîtrise de l'énergie et échangent leurs expériences au sein du réseau européen Energie Cités. Des établissements financiers proposent des prêts spécifiques ou prennent des initiatives en faveur des économies d'énergie.

Des industriels français s'impliquent dans des projets de recherche nationaux ou internationaux visant à mettre au point des produits innovants à forte performance énergétique. C'est par exemple le cas dans le domaine du traitement de l'air, de l'enveloppe, de la régulation et de la protection solaire, du solaire, des pompes à chaleur, mais aussi de projets plus globaux comme le projet HOMES « le bâtiment économe en énergie » dont le leader est Schneider Electric, soutenu dans le cadre de l'Agence pour l'Innovation Industrielle.. La fondation privée « Bâtiment et énergie » est un signe fort de l'engagement de ses quatre fondateurs (Arcelor, EDF, Gaz de France, Lafarge) pour la recherche sur les bâtiments basse consommation.

L'Institut national pour l'énergie solaire (INES) associe des capacités de recherche du CEA, du CNRS, du CSTB en vue de développer, tester et valider des technologies innovantes directement utilisables dans le secteur du bâtiment.

5.1.6.3 Perspectives de recherche

Les travaux en cours sur l'efficacité énergétique des bâtiments n'épuisent pas les questions générées par l'ambition d'une réduction drastique de la consommation, à savoir atteindre un gain global de « facteur 4 » en 2050. Cette ambition suppose en effet, comme souligné par différents rapports récents⁵, à la fois une mise en cohérence rapide pour la réglementation sur les constructions neuves, et

4 Rapport demandé en juin 2004 à un groupe de travail par la DGUHC et la DRAST sur la mise en place d'un dispositif de recherche « maîtrise de l'énergie dans le bâtiment », pour faire suite au « Rapport Chambolle »

⁵ - Avis adopté par le Conseil économique et social le 26 avril 2006 sur les « *Politiques de l'Urbanisme et de l'Habitat face aux Changements climatiques* »

un accent accru mis sur le bâti ancien afin d'atteindre des objectifs d'amélioration de la performance énergétique nettement démultipliés par rapport à la situation moyenne actuelle. Le renouvellement du parc de bâtiments existants est inférieur à 1 % par an, ce qui implique, sauf bouleversement sectoriel, que l'effet du nécessaire durcissement des normes d'efficacité énergétique des bâtiments neufs ne peut influencer que sur 10 à 20 % du parc complet en 2050 : même dans l'hypothèse d'une généralisation à cette échéance des bâtiments neufs à énergie positive, c'est donc bien la rénovation du bâti ancien qui est le facteur principal à même d'influer de façon rapide et significative sur la consommation énergétique globale.

Au-delà des travaux sur les sujets technologiques déjà identifiés (parois opaques et parois transparentes à haute performance thermique, ventilation double flux avec récupération de chaleur, photovoltaïque en toiture et en façade, ...), des réponses devront pouvoir être apportées aux questions suivantes :

- comment intégrer au patrimoine bâti existant de nouveaux modes de production d'énergie (renouvelables, photovoltaïques,...) en prenant en compte les contraintes architecturales, les besoins des habitants, ... ?
- quels nouveaux matériaux et équipements économes en énergie et en ressources naturelles non renouvelables faudra-t-il développer ?
- quelles évolutions technologiques faudra-t-il encore accomplir pour concrétiser le concept de bâtiment à énergie positive et quelles en seront les conséquences aux plans architectural et industriel ?
- comment ces bâtiments à énergie positive s'inséreront-ils dans la ville ?

Dans un premier temps, ces questions, ainsi que les aspects socio-économiques, devront faire l'objet de travaux prospectifs précurseurs de recherches ultérieures.

A titre d'exemple, il est probable que l'optimisation de l'isolation des bâtiments amène à substituer une isolation extérieure à l'actuelle isolation intérieure qui est génératrice de ponts thermiques : un tel changement de conception suppose une adaptation considérable tant de plusieurs métiers du bâtiment, ce qui présuppose des actions lourdes de formation, que de l'appareil de production des matériaux, avec le risque de perturbation économique des sites de production. L'acceptabilité de ce changement par les maîtres d'ouvrage n'ira d'ailleurs sans doute pas de soi. Et c'est pourquoi des concepts architecturaux renouvelés doivent être recherchés, tant pour le neuf que pour la réhabilitation, en intégrant les préoccupations tant énergétiques qu'environnementales.

De façon plus générale, l'objectif de réduction par un « facteur 4 » de la consommation énergétique des bâtiments pose des défis multiples et dont les réponses ne sont pas immédiates. Il faut à cet égard garder à l'esprit que la production électrique décentralisée d'un bâtiment à énergie positive ne conduit pas nécessairement à l'optimum global, notamment pour la gestion des pics de consommation : la production locale directe d'énergie calorifique et, surtout, son stockage doivent être tout autant considérés même si les solutions paraissent à échéance plus lointaine. En outre, au-delà des performances intrinsèques des bâtiments, il convient également d'agir sur les impacts énergétiques et environnementaux d'une part des différentes filières de construction (béton, bois, acier,...) et des composants de construction, d'autre part des choix d'aménagement et d'implantation des bâtiments (accès aux sources et réseaux d'énergie, accès aux différents modes de transport,...). C'est donc une action de longue haleine et aux multiples ramifications qui sera nécessaire pour obtenir les progrès significatifs qui sont visés.

5.1.7 Gisements pour l'efficacité énergétique

Outre les importants gisements d'économie d'énergie mentionnés dans le chapitre précédent sur le bâtiment, il existe des potentiels conséquents dans les autres secteurs.

- Rapport conjoint CGPC-IGE « Comparaison européenne sur les mesures destinées à améliorer la performance énergétique des bâtiments » (janvier 2006)

Le potentiel d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de CO2 dans l'industrie en France et en Europe passe, d'une part, par la mise en œuvre d'une gestion fine de l'énergie et d'autre part par l'optimisation des flux d'énergies au sein des usines. Les systèmes de gestion de l'énergie permettent de surveiller et d'interagir avec la conduite des procédés industriels ou la production d'utilités. Ils contribuent à éviter des dérives de réglages et à conserver une utilisation rationnelle de l'énergie au cours du temps.

Au-delà, des innovations sur les process industriels sont nécessaires : de nouveaux usages très performants de l'énergie et tout spécialement de l'électricité, des reconceptions de process avec une meilleure intégration énergétique, des systèmes de récupération et de valorisation de la chaleur fatale, ou de l'énergie contenue dans les rejets et coproduits. Au final, dans un contexte d'énergie rare et chère, il est important que toute unité d'énergie « injectée » dans une activité donnée soit utilisée au maximum.

L'emploi de techniques performantes conduit bien souvent à un coût d'investissement supérieur, mais contribue dans la majorité des cas, non seulement à une efficacité énergétique améliorée, mais aussi à plus de propreté, de compacité, de précision, de fiabilité et de rapidité du process. Il s'en suit une meilleure maîtrise de la qualité du produit et un accroissement de la productivité.

5.1.7.1 Axes de R&D

Pour atteindre une partie de ces gisements d'efficacité énergétique, des développements sont nécessaires pour favoriser la mise en œuvre de :

- gestionnaires d'énergie associés aux procédés,
- technologies performantes pour l'industrie. A titre d'exemple, le chauffage par induction de solides permet de doubler l'efficacité énergétique de certains fours industriels. Son mode de fonctionnement, sans préchauffage, ni mise en veille contribue à diminuer la consommation finale. Ces techniques nécessitent encore des développements, en particulier pour rendre les inducteurs plus adaptables à la charge et donc plus génériques.

5.1.7.2 Produits sobres et économes

5.1.7.2.1 L'éclairage

L'arrivée de technologies issues de l'électronique dans le domaine de l'éclairage est en train de changer profondément ce marché. Les LED commencent à se généraliser et leur coût diminue tout en ayant des performances en sensible augmentation et une fiabilité qui est déjà meilleurs que la plupart des lampes classiques. Les secteurs de l'éclairage urbain et de la signalisation, ceux de l'automobile et celui de l'habitat envisagent un usage plus systématique de ces technologies. Le développement, plus rapide que prévu, des OLED laisse envisager leur utilisation non seulement dans le domaine des écrans plats mais aussi dans celui de l'éclairage. Plus économes en énergie, plus fiables, plus flexibles, les solutions développées par les LED et les OLED bouleverseront profondément nos habitudes. L'intégration aux matériaux permet d'envisager des utilisations jusqu'alors inédites (intégration de systèmes d'éclairage directement aux plafonds, aux sols, aux murs mais aussi comme éléments de décoration meubles, tableaux ...).

Ce domaine est encore peu développé et l'Europe peut encore être un acteur important. L'Allemagne ne s'y est pas trompée en développant des programmes de recherche ambitieux. Comparativement la France est relativement encore peu engagée.

5.1.7.2.2 Les utilités industrielles

Les actions de maîtrise de l'énergie portent principalement sur la « gestion des utilités » dans l'industrie. Elle peut être définie comme « l'ensemble des moyens de production, transformation, distribution, suivi, contrôle et optimisation des utilités, y compris le traitement des rejets ».

Trois opérations concernent essentiellement les combustibles :

- production de fluides caloporteurs ;
- transport et distribution de fluides caloporteurs ;
- chauffage des locaux.

Quatre autres concernent l'électricité :

- production de froid ;
- éclairage ;
- production d'air comprimé ;
- moteurs (comprend les compresseurs d'air et frigorifiques dans le graphique ci-dessous).

D'après les données de l'étude « Gisement » du CEREN de 1999, la consommation d'énergie dans l'industrie en France induit par cette « gestion des utilités » serait de 25,3 Mtep.

Les utilités représenteraient un gisement potentiel d'économie d'énergie de près de 4 Mtep, soit le tiers du gisement total (12 Mtep identifiés pour l'industrie) mais les 2/3 du gisement économiquement accessible (c'est à dire prenant en compte des technologies déjà existantes sur le marché et des améliorations dans les pratiques).

Les moteurs électriques occupent une grande place dans la consommation d'électricité (70%), que l'on retrouve notamment pour 3 usages faisant parties des « utilités » :

- Compresseurs (d'air et frigorifiques) ;
- Ventilation ;
- Pompage.

Une grande part du gisement est accessible par une meilleure approche, une meilleure gestion, et l'emploi des meilleures technologies disponibles (près de 30% estimés pour chacun des usages ci-dessus).

La R&D doit permettre de développer ce gisement. Elle reste souvent secondaire par rapport aux recherches sur les procédés industriels pour des raisons diverses (morcellement des compétences, pas de demande spécifique du marché, etc.), sauf pour ce qui concerne le froid et certaines branches de la production de l'énergie (co- et tri-génération, ENR ...) notamment pour des raisons réglementaires.

Cependant des pistes fortes existent sur :

- les moteurs électriques avec la mise au point de moteurs à rendement plus élevés (technologie du rotor cuivre, moteurs synchrones à aimant permanent...);
- le contrôle commande : développement de systèmes d'optimisation énergétique globaux, fiables et faiblement consommateurs (variation électronique de vitesse pour les moteurs électriques, gestion technique centralisée...) avec utilisation des NTIC (courant porteur en ligne, communication sans fils (WIFI), et développement des réseaux de communication industriels) ;
- Développement de la supervision et des techniques de mesure souples et fiables (notamment sur fluides caloporteurs : mesure non intrusive).

5.2 Energies renouvelables

5.2.1 Bioénergies

Les bioénergies sont les énergies produites à partir de la biomasse et du biogaz, sous forme de chaleur, d'électricité ou de carburants. La biomasse est la fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture (comprenant les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes. Elle comprend également la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers.

Le développement des bioénergies est une action clef pour permettre à la France d'atteindre les objectifs ambitieux qu'elle se fixe dans le domaine des énergies renouvelables dès 2010 et ce pour tous les usages de l'énergie dans tous les secteurs de consommation :

- augmenter de 50% la production d'énergie renouvelable d'origine thermique ;
- porter à 21% la part de la consommation d'électricité d'origine renouvelable ;
- porter à 7% la part des biocarburants d'origine biomasse.

En France, le potentiel de biomasse encore mobilisable pour l'énergie et les matières premières, sans optimisation de ce potentiel ni culture supplémentaire, est de près de 20 millions de tep dont environ 80% sont constituées par la partie lignocellulosique de la biomasse. Les déchets industriels ou ménagers constituent également une ressource importante dont il faut intensifier la valorisation énergétique.

De façon générale des efforts de recherche sont nécessaires pour réduire les coûts de production des bioénergies et améliorer la disponibilité d'une ressource finie.

5.2.1.1 Etat de l'art des technologies

• Valorisation thermique :

La première application est le chauffage domestique. La bûche est le combustible utilisé principalement dans deux types d'appareils de combustion :

- les appareils indépendants (poêle, insert) : critères « flamme verte » : rendement $> 65\%$, émissions de CO $< 0,8\%$;
- les chaudières associées à un chauffage central avec des rendements $> 80\%$.

Plus récemment on observe le développement d'une filière d'appareils spécifiques alimentés par des granulés.

Les chaudières collectives et industrielles sont à alimentation automatique. Elles présentent un rendement élevé $> 80\%$. On dispose des techniques pour maîtriser les émissions conformément aux réglementations en vigueur, ainsi que de systèmes de régulation centralisés des automatismes.

• Valorisation électrique

On distingue deux familles de technologies :

- La production de vapeur pour alimenter une turbine ou un moteur : cette technique parfaitement éprouvée présente l'inconvénient d'un rendement électrique médiocre (15 à 20%) ;
- La gazéification du bois avec injection des gaz dans une turbine ou un moteur : cette solution permet d'espérer un rendement électrique meilleur (25 à 35%), mais sa maturité industrielle n'a à ce jour pas été clairement démontrée.

• Biocarburants

En France, les utilisations de biocarburants de première génération développées à ce jour sont :

- Le bioéthanol et plutôt son dérivé, l'ETBE (éther), en mélange aux essences. Cette production est assurée par fermentation à partir de betteraves et de blé (une unité de production utilisant le maïs est également en cours de construction) ;
- Le biogazole obtenu par estérification d'huiles végétales (EMHV) en mélange aux gazoles. Cette production est assurée pour l'essentiel à partir de colza et plus marginalement de tournesol. Elle utilisera prochainement les graisses animales et les huiles de friture usagées.

En France ces biocarburants liquides sont utilisés en mélange : soit en faible quantité dans les essences et gazoles distribués à la pompe (taux actuellement inférieur à 1%), soit en tant que co-carburants jusqu'à 30%, pour être utilisés dans des flottes captives (bus, véhicules utilitaires...). C'est notamment le cas de l'EMHV.

- Une autre voie est en cours de test avec les véhicules flexibles (FFV) fonctionnant avec des mélanges à teneurs variables en éthanol et en essence. Ces véhicules sont développés en très grande série au Brésil et connaissent également un développement important aux USA et en Suède. En Europe, ce mélange est orienté vers le carburant spécifique E85, avec 85% en volume d'éthanol anhydre et 15% en volume d'essence. La première flotte française de véhicules Flex Fuel a été mise en service le premier juin 2006 par le Conseil Général de la Marne (7 véhicules Ford). Renault a annoncé qu'il proposerait en 2009 la moitié de sa gamme en Flex Fuel.

Les techniques de production et d'utilisation de ces biocarburants de 1^{ère} génération sont globalement arrivées à maturité.

5.2.1.2 Marchés

• Valorisation thermique

Depuis trente-cinq ans, la consommation de bois de chauffage fluctue autour de 7 à 8 Mtep/an. On constate un creux (6,5 Mtep) au début des années 80 et un pic (9,86 Mtep) en 1991/92. En moyenne sur la période, la consommation de bois s'élève à 7,2 Mtep.

Par ailleurs plus d'un million et demi de tep d'origine biomasse ont été consommées par l'industrie en 2004 et 2005 pour la production d'énergie de process. Les chaufferies industrielles se retrouvent à plus de 95 % dans l'industrie du bois au sens large, c'est-à-dire dans les industries de première et de deuxième transformation, les usines de pâte à papier ou chez les fabricants de panneaux et de contreplaqué.

Enfin, dans le secteur collectif, environ 1500 installations assurent la substitution de plus de 150 000 tep / an.

Cela place la France en tête en Europe grâce une utilisation forte du bois pour le chauffage domestique, devant la Suède (env. 8 Mtep), la Finlande (env. 7 Mtep), l'Allemagne (env. 6 Mtep).

• Valorisation électrique :

La production d'électricité à partir de biomasse a atteint 2,1 TWh pour l'année 2004, 70% étant produit à partir de bois : cette production reste encore relativement marginale en France, concentrée dans le secteur de la pâte à papier. Deux appels d'offres lancés par le ministre de l'industrie en 2004 et 2006 vont permettre la réalisation de nouvelles centrales pour une puissance de plus de 500 MW, l'objectif étant d'atteindre une puissance supplémentaire de 1000 MW d'ici 2010.

La Finlande, la Suède et le Danemark sont les trois premiers producteurs européens d'électricité à partir de Biomasse, totalisant plus de la moitié de la production européenne égale à 35 TWh.

• Biocarburants

Le plan biocarburants adopté par le gouvernement se donne pour objectifs des taux d'incorporation de 5,75 % en 2008, de 7 % en 2010 et de 10 % en 2015. La consommation de biocarburants était de 485 ktep, soit 420 ktep, en 2005. Les agréments organisent les augmentations de la production nationale à

hauteur des objectifs de consommation.

Le marché français est dominé par le biogazole compte tenu de la structure du parc automobile. Dans le monde, c'est l'éthanol qui est le premier biocarburant devant le biodiesel avec 33 592 millions de litres en 2005.

Tableau 9 – production mondiale d'éthanol (en million de tonnes)

Year	Brazil	USA	Canada	Central America	Columbia	China	India	Thailand	Australia	EU	Total
2005	16067	14755	250		150	1000	300	60	60	950	33592
2006*	16745	18168	250	150	300	1000	500	200	60	1400	38773

*prévisionnel

Source : F.O.LICHTS, May 2006

5.2.1.3 Tissu industriel et effort actuel de R&D en France

• Valorisation thermique

Il existe un nombre restreint de fabricants français de chaudières (COMPTE, Energie Système) ; 16 000 unités au total, ont été vendues en France en 2005.

Les constructeurs français d'appareils indépendants (poêles, foyers fermés, ...) sont beaucoup plus nombreux (Brisach, Fondis, Godin, Supra, Turbofonte, Philippe etc..), les ventes de ces appareils représentant l'essentiel du volume des ventes d'appareils de chauffage au bois en France (plus de 400 000 unités en 2005). Ces entreprises au profil et savoir-faire traditionnel et artisanal disposent de moyens de recherche, cependant limités. En dehors des industriels, des laboratoires publics (CEA, LERMAB etc...) ainsi que des centres techniques (CETIAT, COSTIC, CRITT Bois d'EPINAL, CSTB,...) œuvrent activement sur la thématique chauffage au bois.

Les travaux de recherche menés par l'ADEME sur le bois énergie portent sur 2 cibles principales :

1) *Cible chauffage domestique :*

- L'amélioration des rendements des appareils de combustion ;
- La réduction des émissions polluantes ;
- L'automatisation (régulation,...).

L'ADEME a lancé depuis 2005 un programme annuel de R&D associant les industriels du secteur et les laboratoires de recherche. Ainsi, en 2005, 4 projets de R&D ont été financés (montant global de l'aide apportée : 497 k€ pour un coût total des projets de 1 235 k€). En 2006, un second appel à projets a été lancé.

2) *Cible chauffage collectif :*

- La connaissance et la mobilisation de la ressource ;
- Concernant le chauffage collectif, les efforts de recherche sont concentrés au sein du Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB) qui a retenu dans le cadre de son appel à propositions en 2005, 2 projets ambitieux sur la mobilisation de la ressource agricole et forestière (aide totale de 2 243 k€ pour un montant global de programme de 5 317 k€).

• Valorisation électrique

La filière Gazéification est en cours de développement : si on compte quelques fabricants européens (et notamment français) de gazogènes associés à des moteurs à gaz de quelques centaines de kWé, le nombre d'installations reste extrêmement limité en Europe. Plusieurs centrales devraient être construites en France sur la base d'une technologie américaine, ce qui permettra un premier retour d'expérience.

Plusieurs programmes internationaux visent au développement de centrales de forte puissance dont les performances pourraient être équivalentes à celles des centrales au gaz naturel (40 à 45% de

rendement électrique).

• Biocarburants

Le programme de Recherche AGRICE lancé en 1994, a largement contribué à la mise au point des carburants de 1^{ère} génération.

La technologie des biocarburants de 1^{ère} génération exploite les réserves de plantes issues de cultures (ex : colza, tournesol, blé, betterave). Compte tenu des surfaces agricoles disponibles cela permet de fournir jusqu'à 7 à 10 % de la consommation de carburant. Pour aller au-delà il faut mobiliser la totalité de la plante : réserves + partie lignocellulosique (tige, tronc,...) et ainsi élargir la biomasse mobilisable aux résidus d'exploitation agricole et forestière et aux cultures dédiées. On ne dispose pas encore des technologies de conversion de la biomasse lignocellulosique notamment pour la production de carburants de 2^{de} génération. Deux voies de recherches sont explorées : la voie thermochimique (production d'un gaz de synthèse par combustion, pyrolyse ou gazéification pour transformation en carburant liquide ou encore H₂), la voie biologique (production d'éthanol par hydrolyse enzymatique de la lignocellulose et fermentation).

Ce sont là les deux grands axes du Programme National de Recherche sur les Bioénergies (PNRB) lancé en 2005 par l'Agence Nationale de la Recherche et délégué à l'ADEME. Ces recherches associent des industriels (ex : Air Liquide, EDF, GDF, Maguin, Lesaffre, Total, Veolia, etc....), des producteurs de biomasse (Arvalys/ Onidol, ONF, UCFF, etc.), des laboratoires publics (CEA, CNRS, IFP, INRA, INSA, Universités, etc.).

5.2.1.4 Partenariats internationaux

La France, représentée par l'ADEME, est membre de l'accord de coopération de l'agence internationale de l'énergie sur les bioénergies.

La France participe à des travaux de recherche dans le cadre du 6^{ème} PCRD, avec comme partenaires le R.U., l'Allemagne, la Suède, la Finlande, les Pays-Bas, l'Espagne, l'Italie, etc.... et également à une opération de jumelage avec la Bulgarie sur les biocarburants via l'Ademe.

L'ADEME participe à l'ERANET « Bioénergie » qui vise à favoriser des synergies entre les programmes nationaux de R&D.

5.2.1.5 Perspectives de R&D

En vue d'augmenter la production de chaleur et de carburants issus de la biomasse, les axes prioritaires de la recherche sont :

- augmenter la ressource en biomasse mobilisable ;
- accroître la performance environnementale et énergétique des équipements de chauffage ;
- maîtriser la conversion de la biomasse lignocellulosique pour la production de biocarburants de 2^{de} génération ;
- explorer la production de vecteurs énergétiques de 3^{ème} génération (H₂, lipides,...) par des microorganismes ;
- évaluer les impacts socio-économiques et environnementaux.

Pour valider les technologies de production de biocarburants de seconde génération, il sera nécessaire de réaliser un ou plusieurs pilotes de taille significative. Des projets susceptibles de traiter plusieurs centaines de tonnes de biomasse par heure, par la technologie de gazéification, sont à l'étude.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Evaluation des ressources lignocellulosiques	Evaluation, production et mobilisation de la ressource en biomasse lignocellulosique en France	CT
Accroissement de la performance environnementale et énergétique des équipements de chauffage	Etudes sur l'amélioration du rendement et la réduction simultanée des émissions polluantes. Automatisation du fonctionnement des appareils.	CT
Conversion de la biomasse lignocellulosique par la voie thermochimique	R et D sur les verrous technologiques Définition d'une plate-forme de développement Procédés de production d'hydrogène à partir de la biomasse	MT
Conversion de la biomasse lignocellulosique par la voie biologique	Lever le verrou lié au manque d'efficacité de l'hydrolyse enzymatique et la mauvaise conversion des pentoses en éthanol	MT
Production biologique d'hydrogène et de méthane	Valorisation énergétique du biogaz Production d'H ₂ à partir d'effluents et de déchets Production d'H ₂ à partir de substrats lignocellulosiques Production d'H ₂ par des microorganismes photosynthétiques	LT
Production biologique de lipides	Production de lipides par des microorganismes	LT
Procédés de traitement ou co-traitement de matières premières organiques ou de bio produits dans des systèmes bioénergétiques intégrés	Etude des systèmes bioénergétiques intégrés avec une multiproduction de produits. (bioraffineries)	MT
Evaluations socio-économique et environnementale et impacts globaux	Etablissement d'un cadre méthodologique d'évaluation multicritère Comparaison macro-économique Impacts globaux du développement des bioénergies sur l'économie, la société et l'environnement	CT

Tableau 10 – priorités de recherche bioénergies

5.2.2 Géothermie

5.2.2.1 Etat de l'art des technologies

• Géothermie : production de chaleur

La chaleur exploitée est initialement contenue dans l'eau et les roches de réservoirs plus ou moins profonds et chauds (20 à 140 °C).

Le chauffage de bâtiment constitue l'usage majoritaire mais un certain nombre d'applications industrielles nécessitant des niveaux de températures variés (séchage, procédés industriels, agriculture sous serre ou pisciculture) se rencontrent fréquemment.

Si la composition chimique du fluide impose sa réinjection, on aura un forage de production, un échangeur thermique et un forage d'injection. Pour les faibles salinités et faibles profondeurs, un forage de production et le dispositif d'extraction énergétique suffisent, l'exploitation thermique peut se combiner à de l'irrigation ou à de l'alimentation en eau potable.

Les technologies sont bien maîtrisées, que ce soit le forage, l'utilisation des échangeurs thermiques et les pompes immergées. Dans le cas de fluides très minéralisés et corrosifs, la prévention de phénomènes de corrosion et de dépôt a constitué un obstacle technologique qui a été résolu dans les

années 80 et 90 par l'emploi d'inhibiteurs de corrosion et de dépôt.

Il s'agit donc d'une technologie mature. Son déploiement est seulement limité par des paramètres économiques ou géographiques. Il est en effet nécessaire d'avoir à proximité une bonne ressource géothermale et des besoins de chauffage ou de chaleur industrielle. En règle générale, tous les bassins sédimentaires sont pourvus de nappes géothermales, mais le principal obstacle à leur déploiement est d'ordre économique, dans un contexte énergétique volatil.

- Géothermie : production d'électricité

A l'heure actuelle, on produit de l'électricité à partir de ressources géothermales en exploitant des réservoirs dont la température est comprise entre 160 et 350 °C et qui permettent des débits de production de quelques dizaines de kilos par seconde. Ces conditions se rencontrent dans les zones de volcanisme jeune ou de réservoirs chauds et perméables. Sur ces sites, la vapeur produite en tête du forage géothermique alimente une turbine et un alternateur qui produit de l'électricité. Le fluide condensé est ensuite réinjecté dans les gisements afin d'en optimiser la durée d'exploitation. On peut également produire de l'électricité avec des ressources comprises entre 120 et 160 °C. Dans ce cas, le fluide géothermal transmet ses calories dans un échangeur à un liquide organique à bas points de vaporisation dont la vapeur actionne une turbine ; le liquide organique évolue en circuit fermé entre l'échangeur géothermal et un condenseur. Cette technologie devrait permettre de produire de l'électricité à des coûts compétitifs dans des zones non raccordées à des réseaux électriques de forte puissance.

Les productions d'électricité géothermale ont commencé avec une grande ampleur à la fin des années 50 en Nouvelle Zélande et en Italie. Mais il existe encore des progrès à faire concernant le forage géothermique (roches fracturées, dures et chaudes, fluides très corrosifs). Les technologies de turbines, d'échangeurs, de condenseurs, de métrologie et de contrôle sont arrivées à maturité de sorte que la filière n'a besoin de progresser que dans l'abaissement des coûts de production. A l'heure actuelle, les coûts de production sont très variables selon : la taille du champ (effet d'échelle), la profondeur du réservoir, la température et la perméabilité de celui-ci.

En France, les situations favorables se rencontrent en Guadeloupe, Martinique et Réunion, où, d'une part le contexte géologique offre la ressource et d'autre part, les autres modes de production d'électricité ont des prix de revient par nature très élevés, de par le contexte insulaire.

- Géothermie EGS production de chaleur et/ou d'électricité

En géothermie classique, les productions se construisent sur des réservoirs de forte perméabilité capables de fournir des débits de production élevés.

Les technologies EGS de l'anglais « Engineering Geothermal System », s'attachent au développement de champ de faible perméabilité situé en périphérie des réservoirs hydrothermaux classiques ou dans les roches profondes des bassins sédimentaires ou du socle fracturé.

Ces technologies permettent une exploitation plus complète des champs hydrothermaux classiques et de réaliser les productions géothermales en dehors de tout contexte volcanique. Les stocks énergétiques constitués par des granites profonds sous une épaisse couverture sédimentaire sont particulièrement nombreux sur les continents. Le projet Soultz sous Forêt et le projet de Bâle, ainsi que le projet australien en Hunter Valley illustrent parfaitement ce concept.

La technologie consiste à forer un dispositif de un ou plusieurs puits d'injection et de récupération et à augmenter la perméabilité par fracturation hydraulique ou chimique. Selon le niveau de température en tête de puits de production, les applications viseront à la production d'électricité ou de chaleur. Cette technologie a donné lieu à des programmes de recherche aux Etats-Unis, en Europe et au Japon depuis le début des années 80. A l'heure actuelle, le projet européen de Soultz-sous-Forêts qui a permis de franchir de nombreux obstacles dispose d'un triplet de puits à 5.000 m (1 injecteur et 2 producteurs) et constitue le projet de recherche le plus abouti au plan mondial. Pour arriver à un déploiement large de cette technologie, il faudrait localiser avec certitude les zones potentiellement favorables (haute température, fracturation et état des contraintes appropriées), diminuer considérablement le coût de forage et maîtriser totalement les technologies de création de l'échangeur et de gestion de la ressource

thermale.

5.2.2.2 Marchés

• Géothermie : production de chaleur

En France

Les années 70 et 80 ont vu le développement du chauffage d'immeubles à partir de l'aquifère du dogger du bassin parisien et l'utilisation urbaine ou agricole dans le bassin aquitain. Le contre-choc pétrolier joint à l'existence de problèmes techniques de corrosion et de dépôts ont gelé ce développement à partir de la fin des années 80. Les efforts de l'ADEME et des associations de maîtres d'ouvrage en Ile de France laissent penser qu'une dizaine de doublets de forages nouveaux pourraient être réalisés dans les 5 ans à venir à partir du dogger du bassin parisien. L'exploitation d'autres aquifères (Trias, Néocomien) pourrait également s'envisager.

Au niveau de l'Aquitaine, des possibilités nombreuses existent sur les usages agroalimentaires et le traitement de la biomasse forestière, mais les démarrages concrets pourraient venir après le bassin parisien. Des perspectives importantes existent également en Alsace tant pour le chauffage de bâtiment qu'au niveau industriel.

Dans le fossé rhénan, le couloir rhodanien, la Bresse et dans les Limagnes d'Auvergne, les ressources peuvent également donner lieu à des réalisations significatives.

Dans le monde

Les usages directs de la géothermie correspondent à un marché important. Il comporte principalement le chauffage dans les pays fortement urbanisés et à climat continental. L'Europe Centrale, l'Europe Orientale et la Russie présentent ces caractéristiques ainsi que la Chine du Nord et l'Asie Centrale.

Les entrepreneurs français, bureaux d'étude sous-sol et surface peuvent se positionner sur ces marchés, compte tenu de l'image de pionniers développeurs que la France a acquise suite à l'exploitation du dogger du Bassin parisien.

• Géothermie : production d'électricité

En France

A l'heure actuelle la Guadeloupe a une capacité installée d'environ 15 MW sur le champ de Bouillante. Des extensions autour du champ actuel pourraient conduire à un doublement rapide de cette puissance. En Martinique, des zones favorables ont été identifiées mais demandent à être certifiées par des forages profonds, situation que l'on rencontre également dans l'île de la Réunion.

Dans le monde

La production d'électricité géothermale dans le monde progresse rapidement mais le taux de croissance a été réduit depuis le milieu des années 80. On anticipe une reprise de la croissance, en particulier aux Etats-Unis où la capacité installée va probablement doubler dans les 5 prochaines années.

A l'heure actuelle, 8,5 GW de production géothermale électrique sont installées dans le monde et 60 millions de personnes sont alimentées avec cette électricité. Les pays leaders sont les Etats-Unis, le Japon, l'Italie, la Nouvelle Zélande, les Philippines, le Mexique, l'Indonésie et les pays d'Amérique Centrale.

Des développements significatifs sont en cours en Russie et un potentiel considérable existe en Afrique Orientale et Centrale et dans les pays andins de l'Amérique Latine.

Le volume des ressources d'ores et déjà identifiées permettrait de quadrupler la puissance installée actuelle. Ces développements n'étaient limités jusqu'à présent que par le très bas prix des hydrocarbures, l'absence de législation pour l'exploitation de géothermie dans certains pays et les faibles capacités d'investissements, notamment en Afrique. Ce chiffre d'une trentaine de GW pourrait probablement être augmenté si les efforts de prospection qui se sont arrêtés à la fin des années 70 étaient redémarrés.

- Géothermie HFR(Hot Fractured Rock) / EGS

En France

De nombreuses cibles potentielles existent dans le fossé rhénan, dans le Limagne d’Auvergne, dans le couloir rhodanien, voir dans le bassin parisien et en Aquitaine. La production combinée de chaleur et d’électricité présente un avantage certain, par rapport à la seule production d’électricité.

Les potentialités réelles du marché hexagonal se dessineront avec plus de précisions lorsque la maîtrise technologique aura permis de préciser les coûts de production. Un objectif de 8 c€/kWh entre 2015 et 2020 doit être visé. Pour la chaleur, on peut envisager des niveaux de températures très largement supérieurs à ceux du dogger et l’économie de la production pourrait bien s’appliquer à des besoins industriels.

Le développement des technologies EGS dans les îles telle que la Guadeloupe, la Martinique et la Réunion qui sont en périphérie ou à proximité des champs hydrothermaux classiques, constituent un atout considérable pour la production d’électricité dans ces territoires sur le long terme, du fait des gradients géothermiques très élevés.

Dans le monde

Les technologies EGS constituent un enjeu extrêmement important. Leur maîtrise pourrait faire de la géothermie la deuxième énergie renouvelable pour la production d’électricité en base derrière l’hydraulique. Environ 40% de la surface totale des continents pourrait donner lieu à l’implantation de centrale de production de type EGS. Mais la maîtrise des technologies de stimulation de réservoirs, ainsi que la diminution des coûts des forages devront progresser pour permettre la pleine exploitation de ce potentiel.

5.2.2.3 Tissus industriels et efforts de R&D en France

- Géothermie : production de chaleur

Le développement du Bassin parisien et aquitain a permis l’existence d’un réseau de maître d’ouvrage, de bureaux d’étude surface et de bureaux d’étude sous-sol. Le nombre de chacun des intervenants est encore trop limité. Au niveau recherche, les équipes du BRGM sont actives, l’IFP et les Ecoles des Mines pourraient également contribuer.

La technologie des pompes immergées est essentiellement étrangère, alors que les différents constituants de boucles de surface (tuyauteries, échangeurs, vannes, métrologie et contrôle) comportent des fournisseurs nationaux.

- Géothermie : production d’électricité

Le tissu industriel et les capacités de R&D sont relativement limités. La Compagnie Française de Géothermie est actuellement la seule ingénierie sous-sol active dans ce domaine. Enfin, au niveau R&D, le BRGM principalement, le CNRS de façon beaucoup plus modeste ont maintenu une capacité de recherche pour la géothermie haute énergie.

- Géothermie EGS : production de chaleur et/ou d’électricité

Electricité de Strasbourg a pris une part extrêmement active au projet européen de Soultz-sous-forêts. Au niveau recherche, ce sont principalement des équipes du BRGM et à un degré moindre du CNRS et de l’Ecole des Mines de Fontainebleau qui constituent les acteurs significatifs de la R&D. Le niveau partenarial est également caractérisé par des liens forts entre l’ADEME et le BRGM qui ont engagé depuis 2002 des projets de recherche en complément des projets européens.

5.2.2.4 Partenariats internationaux

- Géothermie : production de chaleur

L’Islande, les Etats-Unis, l’Allemagne, l’Italie et le Danemark ont des activités de R&D significatives dans ce domaine. Les années 90 ont connu un ralentissement mondial lié au très faible coût des hydrocarbures. La situation énergétique nouvelle pourrait modifier profondément cette tendance,

surtout si la Commission Européenne, à travers le 7^{ème} PCRD et les actions régionales, décidait de relancer les efforts pour la promotion de la production de chaleur à partir des énergies renouvelables. Les coopérations européennes portent actuellement principalement sur l'intégration des solutions géothermales dans les complexes urbains afin d'optimiser l'efficacité des réseaux de chaleur.

- Géothermie : production d'électricité

La France entretient quelques relations avec les Etats-Unis, l'Islande et l'Italie. Actuellement, il y a peu de projets de recherche en géothermie haute énergie classique dans le 6^{ème} PCRD. Un projet européen sur l'amélioration des outils de prospection vise à jeter les bases de l'exploitation des réservoirs à eau supercritiques, c'est-à-dire, présentant des températures supérieures à 373 °C. L'Islande est en position de leader sur cette thématique futuriste. L'exploitation de ces zones permettrait d'obtenir des productions électriques environ 10 fois supérieures à celles d'un forage classique.

- Géothermie EGS : production de chaleur et/ou d'électricité

L'ensemble de ces projets s'est délibérément construit dans un contexte de partenariats européens. En particulier, les coopérations franco-allemandes ont toujours été extrêmement actives grâce au projet Soultz. Des collaborations existent avec les Etats-Unis et des contacts plus distants avec le Japon et l'Australie. La France n'est actuellement pas présente dans le « Geothermal Implementing Agreement » de l'agence Internationale de l'Energie mais elle fait acte de candidature pour participer à ce groupe de travail important. Au niveau européen, le BRGM s'est vu confier la conduite d'une action de coordination du 6^{ème} PCRD (ENGINE) qui doit faire le point des connaissances actuelles, identifier les verrous de R&D technologiques et ainsi aider la Commission à préparer les futurs programmes de R&D à moyen et long terme.

5.2.2.5 Perspectives de R&D

- Géothermie : production de chaleur

Le point bloquant à l'heure actuelle porte plus sur une connaissance imparfaite des ressources dans certains bassins sédimentaires : Limagnes du Massif Central, couloir rhodanien, delta du Rhône, plaine du Languedoc et piémonts des Pyrénées. En effet, après les grandes synthèses des années 70 rendues possibles par la prospection pétrolière, la connaissance du sous-sol profond a été beaucoup freinée sauf dans le bassin parisien et à un degré moindre dans certaines zones du bassin aquitain. Les opérations de géothermie peuvent rencontrer des débits insuffisants faute d'une connaissance géologique à l'échelle appropriée. Le BRGM qui conduit des recherches sur la géologie profonde serait mobilisable sur ces aspects de connaissance de la ressource.

Pour la conception de schémas d'exploitation optimisés, le BRGM, l'IFP, le CNRS et les Ecoles des Mines présentent des savoir-faire importants.

- Géothermie : production d'électricité

A l'exception de l'exploitation des zones non conventionnelles qui nécessitent une véritable rupture, les objectifs de R&D se résument à une réduction des coûts puisqu'on s'adresse ici à des technologies maîtrisées. Il faudrait en tout premier lieu fiabiliser les méthodes de prospection et notamment les techniques de géophysiques appliquées hors du contexte des bassins sédimentaires. Les recherches sur la modélisation du comportement des réservoirs discontinus sont essentielles dans ce domaine car des implantations de forages de production et de réinjection nécessitent des modèles de réservoirs complexes.

Il convient par ailleurs de renforcer l'exploration, la compréhension et la maîtrise des réservoirs dans les îles volcaniques, notamment les DOM, où une contribution importante est attendue à court terme pour une production d'électricité compétitive.

Les progrès les plus importants sont espérés dans les technologies de forage où il convient de disposer d'électronique de fond de puits permettant de travailler à des températures supérieures à 250 °C.

Les technologies de turbines d'échangeurs, de condenseurs, de métrologie et de contrôle sont

également matures. On doit concevoir des échangeurs plus compacts, abaisser les coûts de contrôle des phénomènes de corrosion et dépôts.

• Géothermie EGS : production de chaleur et d'électricité

Sur le territoire national, il faudrait être capable de produire un modèle 3D de la distribution des températures et idéalement de l'état de contrainte et des perméabilités dans des zones potentiellement favorables du territoire national. Le verrou principal est cependant constitué par des technologies de forage où une division des coûts par un facteur de 2 à 3 changerait radicalement la situation. Des avancées continues : « Measurement While Drilling⁶ », Amélioration des outils de coupe, contrôle des zones de pertes, concept de casing⁷ innovant, laissent espérer des baisses de coûts graduelles. Des technologies plus innovantes telles que « Particles Impact Drilling⁸ », voire le forage par fusion des roches pourraient quitter l'étape laboratoire et modifier le marché du forage à long terme.

Pour la stimulation de l'échangeur, une meilleure connaissance des phénomènes physiques conditionnant l'état des contraintes permettra de mieux maîtriser la stimulation hydraulique. Des essais très prometteurs de stimulation chimiques viendront probablement compléter les méthodes disponibles. Une avancée intéressante est également constituée par l'usage du CO₂ super critique comme le fluide caloporteur en lieu et place de l'eau. Les inconvénients constitués par la plus faible capacité calorifique du CO₂ comparativement à l'eau sont compensés par une viscosité plus faible qui limite grandement les pertes de charge et par une minimisation des phénomènes de dépôts. Dans le domaine de la conversion thermoélectrique, les recherches sur l'adaptation des cycles thermodynamiques bénéficieront également aux technologies EGS.

Avec la fin en 2008 du programme européen à Soultz sous Forêt, il importe, en parallèle de la production d'électricité par l'installation pilote en cours de réalisation, de valoriser les importants investissements réalisés antérieurement, en utilisant cette plate forme dans un programme de recherche pour :

- Acquérir les données sur les paramètres de fonctionnement de ce prototype ;
- Progresser sur la compréhension des mécanismes de création et de maintien dans le temps d'échangeurs profonds ;
- Qualifier les équipements de production.

A moyen terme (horizon 2015), des pilotes sont nécessaires pour prolonger les acquis du prototype scientifique de Soultz et devraient être envisagés sur le territoire national si l'on veut que cette technologie contribue efficacement aux productions d'énergies renouvelables à l'horizon 2030

⁶ mesures en cours de forage assurées par des capteurs insérés dans la garniture du forage dont les indications sont retransmises en temps réel vers la surface; (MWD ou LWD logging while drilling)

⁷ coffrage du puits

⁸ injection de particules d'acier pendant le forage pour percer les roches très dures

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Production de chaleur Recherche de nouveaux gisements	Recherche sur la géologie profonde Conception de schémas optimisés d'exploitation Recharge thermique des aquifères	MT
Production d'électricité Exploitation des zones super critiques Réduction des coûts	Rupture technologique Fiabiliser les méthodes de prospection (hors bassin sédimentaire) Modélisation du comportement des réservoirs discontinus Développement de l'électronique de fonds de puits (>250 °C) Développement d'échangeurs plus compacts Contrôle de phénomènes de corrosion et de dépôts	LT MT CT MT MT MT
Production de chaleur et/ou d'électricité Production d'un modèle 3D national de la distribution des températures, contraintes et perméabilité Meilleure connaissance des phénomènes physiques Amélioration de la technique Amélioration de la conversion thermoélectrique Technologies EGS Prolonger les acquis technologiques de Soultz Capacité à développer des réservoirs stimulés	Modélisations Abaisser les coûts de forage d'un facteur 2 ou 3, amélioration des outils de coupe Forage par fusion Utilisation du CO2 super critique comme fluide caloporteur Recherche sur l'adaptation des cycles thermodynamiques Création de pilote Exploiter la plate forme de Soultz pour maîtriser la création et le maintien à LT des surfaces d'échanges dans un réservoir stimulé	MT LT MT LT LT MT LT LT

Tableau 11- Priorité de la recherche en géothermie

5.2.3 Chauffage thermodynamique

5.2.3.1 Etat de l'art des technologies

Une pompe à chaleur (PAC) est un système thermodynamique qui puise la chaleur dans un milieu naturel appelé « source froide » (eau, air, sol) dont la température est inférieure à celle du local à chauffer. Il transfère ensuite cette énergie au fluide de chauffage (eau chaude, ou air).

Il y a diverses catégories de pompes à chaleur :

- les pompes géothermiques (ou « géothermales ») qui captent l'énergie du sol ;
- les pompes à chaleur sur l'eau qui utilisent l'eau des rivières, nappes phréatiques ; ...

- les pompes *aérothermiques* qui captent l'énergie de l'air extérieur ou extrait.

Fluide	Type	Source	Captage	Fluide capteur	Fluide émetteur ⁹
Fluide frigorigène	Sol/sol	Sol	Capteur enterré	Fluide frigorigène	Fluide frigorigène
	Sol/eau				eau
Eau	Eau glycolée/eau	Eau de nappe ou de puits	Forage ou puits	Eau glycolée eau	idem
	Eau/eau				idem
Air	Air extérieur/eau	Air extérieur	Pompe monobloc extérieure ou intérieure ou Split	Fluide frigorigène	eau
	Air extérieur/air				Air recyclé
	Air extrait/air	Air extrait	VMCdouble flux		Air neuf

Tableau 12– caractéristiques des pompes à chaleur

Quand le fluide caloporteur est de l'eau, l'émetteur est, soit un plancher chauffant, à basse température, soit un radiateur à basse ou haute température. La diffusion d'air peut se faire par plénum¹⁰ ou par gaine.

On caractérise les performances d'une PAC par son **COP** (« coefficient of performance ») dans des conditions données de température extérieure et de diffusion. Le COP est égal au rapport entre la quantité de chaleur produite (Q utile) et la quantité d'énergie électrique consommée (E).

$$\text{COP} = Q \text{ utile}/E$$

Il existe deux grands types de pompes à chaleur : les pompes à chaleur à gaz et les pompes à chaleur électriques.

Une PAC électrique se compose des éléments suivants : un échangeur captant la chaleur dans le milieu extérieur (sol, eau ou air), un compresseur et un système de restitution (échangeur + pompe ou ventilateur) pour transférer la chaleur au milieu intérieur (eau, air). Les PAC réversibles permettent d'assurer la climatisation en été.

Un fluide frigorigène parcourt ces composants en effectuant les phases suivantes d'un cycle thermodynamique : évaporation, compression, condensation, détente ; il permet ainsi de pomper la chaleur de la source froide vers les émetteurs de chaleur.

Pour les PAC géothermales, en moyenne, pour 1 kWh électrique consommé, une PAC produit 2 à 4 kWh de chaleur. Les facteurs influant sur le rendement d'une PAC sont : la température de la source de chaleur et du système de distribution, la consommation d'énergie auxiliaire (pompes, ...), le rendement nominal de la pompe, le dimensionnement de la PAC par rapport à la demande et aux conditions de fonctionnement ainsi que le contrôle de la PAC.

Sur le parc existant en 2005, le COP moyen est de 2,6 pour les applications en rénovation, 2,8 à 3 dans le neuf. Il devrait augmenter sous l'effet des incitations fiscales conditionnées à une performance minimale (COP > 3 en 2005 – 2006).

Les pompes à chaleur à gaz peuvent être de deux technologies : les PAC à moteur gaz et les PAC à absorption.

- Pompe à chaleur à moteur gaz

Le fonctionnement d'une PAC à moteur gaz repose sur le même principe que celui d'une PAC électrique : le fluide frigorigène du cycle thermodynamique est mis en mouvement par un

⁹ On appelle émetteur l'équipement de chauffage final : radiateur, plancher chauffant ou diffuseur d'air chaud (ou frais dans le cadre de climatisation).

¹⁰ Plafond suspendu

compresseur. La principale différence réside dans la source de production de l'énergie de compression. En effet, dans le cas de la PAC à compression gaz, c'est un moteur thermique qui fournit au compresseur son énergie mécanique par le biais d'un arbre ou de courroie(s). Les modèles actuellement distribués existent en version air/air ou air/eau. L'énergie thermique produite par le moteur peut être récupérée améliorant ainsi encore la performance du système. Celle-ci atteint aujourd'hui, en moyenne annuelle, un COP de 1,4 sur PCI.

- Pompe à chaleur à absorption

Dans une PAC à absorption, la compression par moteur est remplacée par un système à absorption couplé à un générateur de chaleur (brûleur gaz). Le fluide véhiculé par le cycle thermodynamique d'une PAC à absorption est un couple frigorigène / absorbant, deux composants naturels qui permettent de s'affranchir des fluides fluorés (CFC, HCFC ou HFC). Le fonctionnement de ce type de PAC est directement lié à l'affinité de ces deux éléments. En effet, l'entraînement du circuit est assuré par le brûleur gaz qui réchauffe la solution frigorigène / absorbant. Le frigorigène ainsi évaporé échange de la chaleur avec le milieu extérieur et le local à chauffer, avant d'être à nouveau absorbé pour finaliser le cycle.

Les développements qui sont réalisés sur cette technologie portent sur des produits à la fois eau/eau et air/eau et montrent des COP atteignant 1,6 sur PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur). L'absence de machine tournante rend par ailleurs le système particulièrement silencieux.

Il s'agit d'une technologie encore en développement ; les principaux travaux sont réalisés par ou en relation avec des constructeurs de chaudières gaz européens et japonais.

5.2.3.2 Marché

En France

En France, les premières installations de pompes à chaleur dans le secteur domestique sont apparues à la suite du 2^{ème} choc pétrolier, dans la période 1979-1985. Après un démarrage prometteur dans le cadre du programme PERCHE (installation de plus de 50 000 PAC en 1982 contre 16 000 trois ans avant), le marché a subi une forte régression (10 000 PAC en 1985), due d'une part à la chute du prix du fioul, d'autre part à des insuffisances en termes de qualité d'équipements et d'installations ; de plus, les installations étaient surtout faites dans l'existant, avec les difficultés techniques inhérentes non maîtrisées à l'époque par les installateurs.

La reprise du marché est intervenue progressivement à partir de 1997 grâce à un encadrement qualitatif (certification des équipements, charte des fabricants et installateurs ...), qui se poursuit aujourd'hui, essentiellement sur le segment du neuf.

Le parc résidentiel individuel compte 130 000 PAC, dont 50 000 installées avant 1997 et 80 000 installées depuis, avec une croissance très forte depuis 2005 : le taux de croissance annuel du marché est passé de 13% en 2002 à plus de 45% en 2005. On note récemment une reprise du marché de la rénovation (relèves de chaudières).

La production de ce parc est estimée à 22,5 ktep en 2005.

Selon les perspectives de croissance les plus ambitieuses le parc en 2015 serait de 1,2 millions d'équivalent logements, dont la moitié pour les PAC géothermales (habitats individuels, collectifs et tertiaires), ce chiffre pourrait être porté à 1,6 millions d'équivalent logements si l'évolution technologique permet de diffuser très largement les PAC sur le marché de la rénovation. Compte tenu de ces perspectives, la structuration de la filière dans une démarche qualité est essentielle et doit être accompagnée par les principaux acteurs (formation, certification, ...).

Dans le monde

Du fait de modes de chauffage différents, les pompes utilisant *l'air* comme fluide caloporteur sont principalement développées aux Etats-Unis et en Asie (chauffage à air), tandis que les pompes utilisant *l'eau* comme fluide caloporteur sont installées principalement en Europe (chauffage central à eau).

Par ailleurs, le marché de la pompe à chaleur *géothermale* s'est plus développé en Europe que dans le reste du monde, avec au 1^{er} rang la Suède qui représente près de 50 % du parc total installé, soit 380 000 équipements vendus en 2004. Elle est suivie par la France et l'Allemagne. Ces trois pays représentent à eux seuls 75 % du marché européen¹¹.

5.2.3.3 Tissu industriel et effort actuel de R&D en France

Des compétences en matière de recherche existent dans plusieurs laboratoires publics, en nombre restreint : Ecole des Mines de Paris, INSA de Lyon et Latap à Pau (Thermodynamique, modélisation, composants, fluide, cycle CO₂, Pompe à chaleur), Laboratoire TREFLE à Bordeaux (modélisation diphasique, échangeurs), CEA/Greth (échangeurs thermiques échangeurs microcanaux), BRGM (composante sous-sol).

Quatre principales catégories d'industriels sont présentes sur le marché :

- Des fabricants exclusifs de PAC (45% des parts de marché en France), qui représentent une douzaine d'entreprises de petite taille (300 à 5 000 PAC par an). ;
- Des fabricants de chauffage électrique et de ballon ECS (10% du marché) de taille plus importante. Il en existe 5 ou 6 en France ;
- Des climaticiens (35% du marché), une dizaine en France ;
- Des fabricants de chaudières (10% du marché) de plus en plus nombreux aujourd'hui.

Ce sont les industriels du froid, de la climatisation, qui sont les plus à même, compte tenu de leur taille, de lancer des actions de recherche mais ces recherches portent aujourd'hui essentiellement sur les machines produisant du froid. Ces recherches sont aujourd'hui principalement menées dans des centres à l'étranger (Europe, Etats-Unis ou Japon).

EDF mène depuis plusieurs années des actions de R&D pour promouvoir le marché de la pompe à chaleur, notamment pour la rénovation des installations de chauffage central équipée de chaudière combustible.

Les industriels français se positionnent plus sur les PAC électriques que sur les PAC à gaz.

Des efforts particuliers sont menés par les principaux acteurs pour améliorer la qualité des équipements : par l'AFPAC pour les PAC et par l'ADEME, le BRGM et EDF pour les forages des sondes géothermales et les capteurs horizontaux. Ces derniers mènent aussi des actions de formation et d'animation de la filière. Le BRGM réalise par ailleurs des actions d'inventaires des potentialités des aquifères superficiels pour les pompes à chaleur sur nappe aquifère, en vue de permettre le développement de la demande.

5.2.3.4 Partenariats internationaux

La France est membre de l'accord de coopération de l'agence internationale de l'énergie sur les pompes à chaleur (IEA HPC).

Elle participe à des travaux de recherche dans le 6^{ème} PCRD. On peut citer parmi les partenaires le R.U., l'Allemagne, la Suède, la Belgique, la Suisse, l'Espagne et l'Italie.

5.2.3.5 Perspectives de R&D

La politique nationale en faveur des énergies renouvelables thermiques envisage que la part des PAC performantes dans la production de chaleur soit multipliée par un facteur proche de 4 à l'horizon 2015.

Sans oublier la réduction de l'impact environnemental des PAC (fluides frigorigènes notamment), deux axes prioritaires de recherche sont :

- la réduction des coûts. Actuellement une PAC géothermale avec sonde verticale coûte de 9 000 à 11 000 € ;

¹¹ Source Observ'ER

- l'adaptation des PAC au marché de la rénovation.

Pour les PAC à gaz, les principaux axes de progrès se situent sur l'amélioration du rendement du moteur thermique ainsi que sur la réduction de ses émissions.

Les principaux freins technologiques se situent au niveau du couple frigorigène / absorbant : substitution de la solution eau ammoniac et des fluides frigorigènes (eau – ammoniac – hélium). Les marges de progrès portent sur la réduction de la quantité de fluides frigorigènes et l'optimisation du fonctionnement du système brûleur / échangeur et in fine la diminution des coûts d'investissement et de la maintenance.

Par ailleurs les performances et les impacts environnementaux des échangeurs souterrains restent un champ peu connu, qu'il convient de documenter. Le Conseil Régional Centre se prépare à lancer un pôle d'excellence technologique européen en géothermie. Dans ce cadre, une plate forme de R&D sur la performance et l'impact des échangeurs souterrains devrait être mise en place par le BRGM.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Adapter les produits à la rénovation dans l'existant	Pompes haute température (fluides, compresseurs)	CT
	Réduction de l'encombrement (échangeur)	CT
	Rendre moins intrusive et moins chère la mise en œuvre des capteurs enterrés dans un terrain existant	CT
Réduction de l'impact environnemental	Optimisation des ventilateurs pour la réduction du bruit des unités extérieures Réduction de l'impact environnemental de l'échangeur souterrain	MT
Nouveaux fluides	CO ₂ , hydrocarbures, le nouveau fluide annoncé par les chimistes	MT
Augmentation de la performance (COP >> 3)	Rendement des compresseurs, intensification des échanges, échangeurs microcanaux Couplage avec stock Contrôle commande Conception optimisée par prise en compte des régimes variables et hors nominal	MT

Tableau 13– priorités de recherche chauffage thermodynamique

5.2.4 *Solaire Thermique*

5.2.4.1 Etat de l'art des technologies

Plusieurs typologies d'installation permettent de recourir à l'utilisation de l'énergie solaire thermique dans le bâtiment :

- Le chauffe-eau solaire individuel (CESI) et les chauffe-eau solaires collectifs, qui sont des technologies largement matures, avec généralement des matériels de bonne qualité. Ces systèmes sont destinés à la production d'eau chaude sanitaire. En collectif, le concept de Garantie de Résultats Solaires (GRS) avec performances garanties au maître d'ouvrage permet d'obtenir une excellente pérennité des installations ;
- Les Systèmes Solaires Combinés (SSC) qui contribuent à la fois à la production d'eau chaude et au chauffage des locaux. Ces systèmes sont principalement diffusés en maison individuelle, et restent encore aujourd'hui des technologies à parfaire (même si ce n'est pas le cas de tous les systèmes commercialisés), faute d'efforts de R&D d'une part et de normalisation d'autre part suffisamment importants. Même si une demande en secteur collectif commence à apparaître, le principal marché reste celui de la maison individuelle ;

- Les systèmes de froid/rafraîchissement solaire qui aujourd'hui restent encore des technologies au stade de la démonstration et pour lesquelles des améliorations substantielles doivent être réalisées pour viser une diffusion plus large.

En règle générale, on peut constater que le capteur solaire est un produit fiable, performant et durable (sous réserve qu'il dispose des certifications adéquates), mais que des évolutions technologiques sont à envisager pour réduire les coûts (utilisation de process de fabrication de masse). Quant aux systèmes associés à ces capteurs, en dehors de la production d'eau chaude sanitaire, un potentiel important d'évolution existe pour accroître fiabilité, performances et réduction des coûts.

5.2.4.2 Marché

En France

En France, après une période florissante à la suite des chocs pétroliers, le marché s'est écroulé à la fin des années 80. Les principales raisons de cette décroissance ont été la baisse du prix de l'énergie, mais aussi une insuffisance de qualité à la fois sur les équipements et leur installation.

Une légère reprise du marché s'amorçait vers la fin des années 90, qui a été très largement confirmée avec la mise en place du plan Soleil (Ademe), relayé par le crédit d'impôt au taux de 40% en 2005, puis 50 % en 2006.

Avec le plan Soleil, c'est aussi un dispositif d'encadrement de la qualité qui a vu le jour avec « les listes de matériel éligible aux aides » et la qualification des installateurs au travers de la charte Qualisol. Ce dispositif a été repris par la profession avec la mise en place du crédit d'impôt.

Les effets de cette politique volontariste se traduisent par un doublement du marché métropolitain chaque année depuis 1999. L'année 2005 a vu en outre une croissance très importante du secteur des SSC qui s'explique à la fois par le passage des aides ADEME au crédit d'impôt et par l'augmentation conséquente du prix du fioul et du gaz.

En Europe et au niveau mondial

Au niveau européen, la situation est contrastée avec des pays où le marché est établi et très important (Allemagne, Autriche et Grèce), des pays où le marché est encore modeste mais enregistre une forte croissance (France, Espagne et dans une moindre mesure l'Italie) et des pays où le marché demeure modeste.

En terme de puissance installée, l'Europe des 25 compte environ 3300 m² capteurs/100000 habitants et la France n'atteint que le tiers (1100 m² capteurs/100000 habitants) de cette valeur¹².

La croissance du marché européen a été de 13% par an entre 1999 et 2004.

Au niveau mondial, la Chine enregistre un marché très fort avec 13 500 000 m² produit en 2004, et une croissance de 25 % par an entre 1999 et 2004.

5.2.4.3 Tissu industriel et effort actuel de R&D en France

Au niveau du tissu industriel français, on observe que celui-ci est très réduit avec la présence des 2 acteurs historiques, Giordano et Clipsol, qui produisent la plupart des équipements y compris les capteurs sur le territoire français. A côté de cela, d'autres industriels (Atlantic, De Dietrich, Viessmann) produisent des composants utilisés dans les installations solaires : les ballons d'eau chaude, Enfin, au cours de l'année 2006, Viessmann va mettre en service une ligne de production de capteurs solaires à Faulquemont.

A côté de ces acteurs qui produisent tout ou partie des équipements en France, l'importation en provenance de l'Allemagne et de l'Autriche représente près de 75 % des surfaces de capteurs solaires vendues en France en 2005. On trouve dans ces deux pays des acteurs importants, comme Buderus, Wagner et GreenOneTec.

¹² "Solar Heat WorldWide, markets and contribution to the energy supply 2004" – Solar Heating and Cooling Programme – International Energy Agency

Des compétences en matière de R&D existent en France avec la présence de plusieurs petites équipes de R&D (INSA, Université de Savoie, Université de la Rochelle, CNRS Perpignan, CSTB, COSTIC, EDF, GDF). Avec la mise en place de l'INES, la France se dote d'un centre de R&D fédératif et de taille plus conséquente, qui lui permettra de mieux se positionner à l'échelle européenne. Quant au secteur industriel français, ses capacités de R&D sont aujourd'hui relativement limitées.

5.2.4.4 Partenariats internationaux

La France est membre de l'accord de coopération de l'agence internationale de l'énergie sur le solaire thermique (IEA SHC).

Les différents laboratoires et industriels français participent à des travaux de recherche dans le cadre des 5^{ème} et 6^{ème} PCRD. Parmi les pays partenaires figurent notamment l'Allemagne, l'Espagne, l'Autriche, la Suisse, ...

5.2.4.5 Perspectives de R&D

Les efforts de R&D doivent viser les 4 objectifs prioritaires suivants : la réduction des coûts, l'augmentation des performances des produits et des systèmes, la durabilité et l'intégration du solaire à plus grande échelle.

Objectifs de R&D	Travaux	Horizon
La réduction des coûts		
Capteur solaire	- Utilisation des matériaux polymères et de leur process - Produit multifonction (isolation et capteur solaire)	CT CT
Stockage de chaleur	- Intégration au bâti (couleur montage, façade solaire..)	CT CT
Systèmes : - chauffage/eau chaude - froid/climatisation/ventilation	- Stockage dans la masse thermique du bâtiment	CT CT
Système de rafraîchissement	- Simplicité de mise en œuvre - Développement de composants spécifiques à la rénovation - Utilisation du vecteur aéraulique pour le chauffage - intégration du solaire à la VMC double flux	MT MT CT CT
Le chauffage urbain solaire et les process industriels à basse température (<200 °C)	- simplification/fiabilisation des machines - développement de capteur grande surface	
L'augmentation des performances		
Stockage de la chaleur	- stockage à eau (réduction des pertes thermiques et amélioration stratification)	CT
Système de chauffage et de production d'eau chaude	- optimisation couplage avec appoint - amélioration de composants spécifiques à la rénovation (capteur/isolation/émission de chaleur)	CT CT
Contrôle commande	- amélioration des fonctions - systématisation du monitoring par le développement de solutions bas coût - réduction de consommation des auxiliaires - utilisation des NTIC - autocontrôle des performances énergétiques - Développement de maintenance prédictive	CT CT CT CT MT

Le chauffage urbain solaire et les process industriels à basse température <200 °C	- augmentation des performances à température élevée capteur à faible concentration - optimisation de la gestion multi énergies (solaire, biomasse, cogénération, fossiles, PAC) et multi utilisation (chauffage/froid/ECS/électricité)	MT MT
La durabilité		
Contrôle commande	- NTIC : prévision météo, diagnostic et surveillance à distance - Maintenance prédictive	CT CT
Chauffage urbain	-Traitement de surfaces (absorbeurs, vitrages, réflecteur, ...) en adéquation avec le niveau de température	MT
L'intégration du solaire à plus grande échelle		
Capteur	- Utilisation des polymères - Produits multifonctions	CT CT
Systèmes de chauffage et de production d'eau chaude	- Composants pour la rénovation des bâtiments	CT
Contrôle commande	- Systématisation du monitoring - Autocontrôle des performances énergétiques	CT

Tableau 14 - Priorité de recherche –Solaire thermique

5.2.5 Solaire photovoltaïque

5.2.5.1 Etat de l'art des technologies

Les systèmes PV sont composés de cellules (transformation de l'énergie lumineuse en courant électrique continu), de modules (ensemble de cellules couplées) et du composant final. Pour les sites isolés du réseau électrique, un système de stockage (généralement électrochimique) est adjoint au système. Dans le cas des systèmes raccordés au réseau qui représentent l'essentiel du marché mondial et national aujourd'hui le courant continu, issu des modules, est transformé en courant alternatif via un onduleur.

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour la réalisation de cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents.

Technologie	Rendement de conversion	Durée de vie
Silicium cristallin	15 à 17 % (industriel)	35 ans
Couche mince Silicium amorphe	7% (industriel)	< 10 ans (en extérieur)
Couche mince CIS	12% (laboratoire)	Non évaluée
Filière organique / inorganique	5%	Très faible actuellement

Tableau 15– technologies et performances des cellules photovoltaïques aujourd'hui

5.2.5.2 Marché

Dans le monde

Le marché du photovoltaïque est en très forte croissance depuis 20 ans (15% entre 1985 et 1995, puis 35% entre 1995 et 2003 et plus de 40% depuis 2003). Cette progression résulte de la politique très volontariste au Japon qui a fortement soutenu les industriels de la microélectronique pour le développement de cette filière et organisé le déploiement d'installations dans le pays. En Europe,

l'Allemagne a développé son marché depuis les années 1990 à travers des programmes nationaux (« 1000 toits solaires » puis « 100 000 toits solaires ») et depuis 2000 par une politique de tarif de rachat de l'électricité solaire très attractive (0.5 €/kWh) ce qui a permis de passer de 20 MW installés par an en 1999 à 360 MW en 2004.

En France

Le marché français est encore relativement réduit, mais il est en train de décoller. Les nouvelles incitations mises en place récemment sont de nature à créer une impulsion nouvelle : crédit d'impôt sur les équipements et l'augmentation du tarif de rachat de l'électricité (0.3 €/kWh) avec la spécificité d'une forte prime à l'intégration au bâti (0.25 €/kWh).

5.2.5.3 Tissue industriel et effort actuel de R&D en France

En trente ans le secteur photovoltaïque a vu des réalisations industrielles d'envergure. Photowatt international qui appartient au groupe canadien ATS atteindra bientôt une production annuelle de 30MW sur la filière Si cristallin. C'est la seule production sur les sols français visible dans les bilans mondiaux. A côté, des structures plus modestes mais solides se maintiennent ou prennent forme. A titre d'exemple la société Solems qui est restée sur la filière silicium amorphe qui n'a pas connu l'essor espéré produit environ 0,5MW annuel depuis sa création. Sur la même filière, la société FEE-France produit environ 0,6MW par an. La société Emix récemment créée a « tiré » un premier lingot de fabrication de silicium polycristallin par un procédé de coulée continue électromagnétique et creuset froid en 2004. Invensil/Ferro Atlantica développe une unité pilote de fabrication de silicium à Chambéry.

L'activité « systèmes » a généré d'autres PME performantes qui représentent un équivalent d'environ 500 emplois directs sur des marchés de sites isolés (DOM TOM) et sur des marchés orientés vers le l'intégration au bâtiment.

Deux instituts ont été récemment créés pour fédérer les compétences académiques au niveau national :

- INES CEA/CNRS dans la filière silicium et la filière organique/inorganique. Cet institut constituera la tête de pont du PV en France avec une taille comparable (environ 200 personnes) à celle des grands instituts étrangers ;
- IRDEP unité mixte de recherche EDF/CNRS/ENSCP (environ 35 personnes) dans la filière des couches minces.

L'action concertée de l'ADEME (2 à 3 M€ / an) et de l'ANR (10 M€/an en 2005 et en 2006) a permis de développer la R&D avec un nouvel élan.

Dans le domaine des cellules photovoltaïques, les projets retenus concernent la filière du Silicium cristallin, la filière « couches minces » et la recherche exploratoire afin de promouvoir de nouveaux concepts.

Dans le domaine des systèmes photovoltaïques, les projets retenus concernent essentiellement la baisse des coûts aussi bien pour les systèmes raccordés au réseau que pour les systèmes en sites isolés.

Ces projets sont parfaitement en accord avec les cibles prioritaires de R&D du futur programme cadre européen (FP7).

De grands industriels français soutiennent le développement du photovoltaïque : Total, EDF, Saint Gobain.

Total est impliqué dans la filière silicium au travers d'une filiale franco-belge Photovoltec pour la production de cellules, au travers de la filiale Tenesol (Total-EDF) pour la fabrication de modules, au travers de la filiale Atotech pour la filière des couches minces CIS. Total est partenaire de plusieurs projets soutenus par l'ANR sur des voies innovantes comme le silicium ruban, sur les cellules tandem en silicium amorphe.

EDF est impliquée dans le développement d'une filière industrielle selon un procédé original dans la filière CIS (technologie des couches minces à partir de semi-conducteurs : Cuivre – Indium – Sélénium). Au sein de l'IRDEP sont développées les activités de recherche sur le CIS et les nouveaux

concepts à très haut rendement. Ces actions sont soutenues par l'ANR. EDF est prête à intégrer l'électricité d'origine photovoltaïque dans ses réseaux de distribution.

Saint Gobain a déjà une activité dans la chaîne complète du PV depuis la fabrication de moules pour la fonderie des lingots de Si jusqu'à la fabrication des verres pour les modules PV, pour la fabrication d'abrasifs de découpe, pour l'élaboration de matériaux d'encapsulation Saint Gobain est partenaire de plusieurs projets ANR depuis 2005 sur les couches minces (CIS et Si amorphe) et sur les composés organiques. Saint Gobain s'implique aussi sur l'intégration du PV dans les bâtiments.

APEX BP SOLAR, implanté près de Montpellier, développe des systèmes intégrés aux bâtiments.

Enfin IMERYS TOITURE, le plus important fabricant français de tuiles traditionnelles, a développé des tuiles photovoltaïques, prémisses d'un courant d'innovation portant sur les composants photovoltaïques intégrables au bâti, courant promu par les pouvoirs publics via le nouveau tarif d'achat français.

5.2.5.4 Partenariats internationaux

Les partenariats internationaux sont développés dans le cadre des projets européens PCRD. On peut citer parmi les partenaires l'Allemagne, la Belgique, les Pays-Bas, l'Espagne et l'Italie. Dans le cadre de l'appel à propositions 2006 du programme Solaire photovoltaïque, certains projets ont comme partenaires des laboratoires allemands, belges et néerlandais.

La France participe à l'accord de l'Agence Internationale de l'Energie sur le solaire photovoltaïque (PVPS) ainsi qu'à la plate-forme technologique européenne.

5.2.5.5 Perspectives de R&D

Les efforts de recherche vont être des éléments décisifs pour l'augmentation des performances et la baisse des coûts des filières matures. Ils doivent aussi susciter l'émergence de nouveaux concepts pour les filières du futur. On estime qu'à l'horizon 2015, la nouvelle génération de matériaux sera prête.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Baisse des coûts des systèmes	Amélioration des onduleurs	CT
	Optimisation de la gestion du système complet en intégrant PV dans les systèmes énergétiques	MT
	Développement de produits adaptés à l'intégration au bâti (tuiles solaires ...)	CT
Amélioration du rendement et baisse des coûts des cellules	Amélioration du silicium métallurgique architectures de cellules (20% de rendement pour les cellules Si, environ 1€/W en 2010)	MT CT
	Développement industriel pour le CIS	MT
Nouveaux concepts	Nouvelles architectures de cellules à très haut rendement	LT
	Récupération de la chaleur Utilisation d'une plus grande partie du spectre solaire	LT
Couplage au réseau / stockage	Maximum de puissance de stockage dans le minimum de volume et de masse	
Nouveaux matériaux	Filière organique/inorganique à très bas coût fiable dans le temps	LT

Tableau 16– priorités de recherche solaire PV

5.2.6 Solaire à concentration

5.2.6.1 Etat de l'art des technologies

La concentration du rayonnement solaire sur un seul foyer permet d'atteindre des températures élevées. Ce principe met en œuvre soit des capteurs de forme parabolique ou cylindro-parabolique, soit des centrales dite « à tour », pour lesquelles une multitude de miroirs orientables, appelés héliostats, concentrent l'énergie solaire sur une chaudière unique située sur une tour. Cela rend possible le réchauffement de fluides caloporteurs, en général de l'huile ou des sels fondus, dans une gamme de température allant de 250 à 2000 °C, avec un rendement supérieur à 70% (rapport chaleur utile/énergie incidente). Il existe trois grandes classes de technologies résumées ci dessous

	Centrales solaires cylindro-parabolique	Centrales solaires à tour	Paraboles solaires Dish-Stirling
Description	Auges paraboliques d'un rayon de courbure de 2 à 2,5 m et d'une longueur de 20 m Concentration sur un tube à fluide caloporteur. Turbine à vapeur Amélioration : réflecteurs linéaires de Fresnel	Concentrateur à tour avec héliostats renvoyant le rayonnement sur le concentrateur Fluide : sel fondu, air ou sodium Turbine à vapeur ou cycle combiné Amélioration : système multi-tours	Miroir parabolique de diamètre 10 m Concentration sur un moteur Stirling à combustion externe dont la source chaude est du sodium, le gaz moteur de l'hélium ou de l'hydrogène.
Concentration ¹³	60 à 400	700 à 1 200	6 000 à 10 000
Température de travail	270 à 450 °C	400 à 1 000 °C	600 à 1 200 °C
Rendement annuel net ¹⁴	10 – 14 %	12 – 15 %	18 – 21 %
Coût d'investissement	2,8 à 3,5 €/We	3 à 4 €/We	10 à 14 €/We
Unité de capacité maximum installée	80 MWe (SEGS IX)	10 MWe (Solar Two)	25 kWe (SES Boeing)
Commercialisation.	Commercialisé	Prototype	En cours
Application	Production centralisée d'électricité, chaleur industrielle	Production centralisée d'électricité, chaleur industrielle HT	Petites unités décentralisées

Tableau 17– technologies solaires à concentration

Cette chaleur primaire peut ensuite être convertie en vecteurs énergétiques comme l'électricité ou l'hydrogène, ou être utilisée directement dans des procédés industriels.

La seule contrainte de cette technologie est qu'elle ne peut valoriser que le rayonnement direct du soleil. Un ensoleillement de 1800 (Odeillo) à 2000 kWh/m²/an est le seuil minimum estimé nécessaire pour obtenir un rendement suffisant (Almería¹⁵ en Espagne est à 2014 kWh/m²/an)¹⁶. De plus il faut une atmosphère « transparente » non chargée de particules qui dévient ou absorbent les rayons solaires.

¹³ rapport de la surface de collecte sur la surface du capteur

¹⁴ un apport de chaleur par combustion de gaz naturel, limité à 25 % de l'énergie totale, assure la continuité de la production d'électricité en période de faible ensoleillement

¹⁵ Ancien site d'une centrale à sodium liquide construite par l'AIE en 1981

¹⁶ NB : les chiffres généralement fournis dans les atlas de données concernent l'ensoleillement global (direct+diffus) incident sur le plan horizontal

5.2.6.2 Marché

En France

En 1968-1969 un grand four solaire fut construit à Odeillo près de Font Romeu (2400 heures annuelles de ciel clair). Cette installation était constituée de 63 héliostats plans orientables renvoyant la lumière sur un concentrateur concave formé de 2000 m² de miroirs orientables. L'installation atteignait une puissance de 1 MW et des températures de 3200 °C.

Après cette première étape la décision fut prise de construire la centrale expérimentale de Thémis, située à Targassonne, non loin d'Odeillo. Le coût du kWh produit par Thémis était supérieur aux attentes, (coût de mise au point du prototype) ce qui a conduit rapidement à l'arrêt de la centrale.

Dans le monde

Avec près de 2000 MW_e en projet dans le monde, les concepts de centrales solaires thermodynamiques de deuxième génération émergent aujourd'hui, grâce notamment aux politiques incitatives qui se mettent en place dans quelques pays (Espagne, USA) et à la coopération internationale. Le coût de production de l'électricité se situe entre 0,15 €/kWh_e et 0,18 €/kWh_e (en deçà du coût de production du solaire photovoltaïque, lequel est utilisé, il est vrai, à des puissances de 100 à 1000 fois inférieures plus facilement intégrables aux bâtiments) pour des unités de 50MW_e sous climat méditerranéen (Andalousie, Espagne).

5.2.6.3 Tissu industriel et effort actuel de R&D en France

Des compétences en matière de recherche existent dans plusieurs laboratoires publics et privés en nombre restreint.

Un groupe de travail associant industriels et laboratoires publics s'est constitué pour proposer et mettre en œuvre une stratégie collaborative de R&D. Avec Odeillo et Thémis (renouvelable), la France dispose de l'une des deux plates-formes européennes les plus importantes sur le solaire concentré (installations de 1 MW_{th} à 5MW_{th}).

La fabrication d'une centrale solaire nécessite des industriels verriers, des chaudiéristes/échangeur thermique, des fabricants de structure métallique, des intégrateurs. Toutes ces compétences peuvent se trouver dans le tissu industriel français. A titre d'exemple Saint Gobain est partenaire des espagnols dans le programme SOLAR III.

5.2.6.4 Partenariats internationaux

L'AIE, l'agence internationale de l'énergie, a établi dès 1977 un programme de coopération (SolarPACES) portant sur la R&D dans le domaine de la concentration de l'énergie solaire. 15 pays, dont la France, y participent.

Le laboratoire virtuel SOLLAB, créé fin 2004, associe, sur la base d'un accord, les quatre laboratoires les plus actifs en Europe à savoir le CIEMAT (Espagne), le DLR (Allemagne), l'ETH (Suisse) et le CNRS (Laboratoire PROMES à Odeillo).

La France participe aussi à deux programmes de recherche dans le cadre du VI^{ème} PCRD.

On peut considérer que, malgré le ralentissement des activités après l'arrêt de Thémis et la basse priorité mise sur cette filière, la France est restée un partenaire de recherche important dans le domaine du solaire concentré.

5.2.6.5 Perspectives

Le coût de production de l'électricité se situe entre 0,15€/kWh_e et 0,18 €/kWh_e pour des unités de 50 MWe sous climat méditerranéen (Andalousie). Une réduction de 25% à 30% de ce coût pourrait être atteinte en 2015 grâce aux innovations techniques apportées par les travaux de recherche sur les filières solaires thermiques et leurs composants (miroirs, récepteurs, fluides et stockage). L'installation d'une capacité totale de 5000 MW_e permettrait par effet d'apprentissage une réduction supplémentaire des coûts et rendrait ces technologies concurrentielles avec les technologies conventionnelles (5-7

c€/kWh)¹⁷ notamment dans les zones où la production est en phase avec la pointe de consommation liée à la climatisation.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Améliorer les performances des composants	Revêtements sélectifs et anti-rélecteurs pour absorbeurs (récepteurs), revêtements pour miroirs	CT
	Augmentation de la température de fonctionnement des récepteurs solaires (T>1000°C pour récepteurs à gaz).	CT
	Intensification des échanges fluide-paroi, intensification des transferts en milieu poreux.	CT
	Fluides caloporteurs offrant des possibilités de stockage HT.	CT
	Simulation numérique et expérimentation des écoulements gazeux à très haute température	MT
Rechercher des solutions pour le stockage journalier de chaleur à haute température	Matériaux, systèmes et évaluation des performances pour le stockage de chaleur HT (chaleur sensible, chaleur latente)	MT
Rechercher des solutions pour le stockage saisonnier	Stockage chimique (réactions renversables, cycles à sorption avec réactions solides-gaz).	LT
Analyse des systèmes	Analyse et prévision de la ressource	CT
	Intégration des composants solaires dans les systèmes de production (couplage avec cycles thermodynamiques, gestion des transitoires rapides)	CT
	Evaluation des performances instantanées et annuelles, simulation dynamique des systèmes. Conception optimale en fonction d'objectifs de production.	CT
	Expérimentations à l'échelle pilote (1 MWe) et démonstration (10-20 MWe) sur le territoire national pour la production d'électricité ou la cogénération.	MT
Produire de l'hydrogène solaire	Craquage thermique de méthane ou de gaz naturel : étude des mécanismes réactionnels, réacteurs solaires, estimation des performances	MT
	Cycles thermochimiques de dissociation de l'eau à très hautes températures : études expérimentales des réactions, réacteurs solaires, analyse des procédés	LT

Tableau 18– priorités de recherche solaire à concentration

Les progrès fait depuis Thémis permettent de penser que la France pourrait exploiter quelque centrales solaires (la côte méditerranéenne présente un potentiel de 10 % inférieur à celui d'Almeria en Espagne).

De plus un réel marché existe pour le dessalement de l'eau de mer. Actuellement les Allemands et les Espagnols travaillent dans ce sens pour fournir des tels produits à l'Arabie Saoudite et autres pays arabes. Ce marché, ainsi que celui de la production décentralisée dans les PVD, constituent des perspectives intéressantes à l'export. D'ailleurs, l'Allemagne, qui ne dispose pas du potentiel solaire suffisant, soutient beaucoup ses entreprises à l'export et se pose en leader.

¹⁷ d'après A Ferriere Laboratoire PROMES – CNRS mars 2005

5.2.7.1 Etat de l'art

Malgré la simplicité apparente de l'éolienne, les mécanismes de fonctionnement de ce type de machine sont complexes. La grande variation de la vitesse des vents exige une résistance exceptionnelle des composants.

L'évolution de l'énergie éolienne repose tout d'abord sur des progrès techniques considérables. Un aérogénérateur est une machine robuste conçue pour une durée de vie de 20 ans.

Il existe plusieurs types d'éoliennes : à axe horizontal qui représente la majorité des éoliennes (leur axe de transmission est parallèle au sol) ou à axe vertical, beaucoup plus rare.

L'équipement pour produire l'énergie se situe dans la nacelle qui peut peser plus de 50 tonnes. Elle comporte une ou deux génératrices, une boîte de vitesse (sauf pour les systèmes Direct Drive), un système de freins à disque et différents équipements automatisés d'asservissement. Un multiplicateur relie le rotor au générateur.

La taille des aérogénérateurs s'est accrue très rapidement. Le diamètre des machines installées au début des années 80 était inférieur à 18 m et leur puissance limitée à 100 kW. Le standard des machines est passé à 500 kW (40 m de diamètre) au début des années 90 et à 1 à 2 MW (50 à 70 m de diamètre) fin des années 90. Aujourd'hui on en est à des aérogénérateurs de 2 à 5 MW (80 à 112 m). La productivité des aérogénérateurs installés au début des années 80 au Danemark était inférieure à 500 kWh par an par mètre carré balayé, la productivité de ceux installés après 96 sur les mêmes sites dépassait 1000 kWh/an/m² par machine. Cette forte progression provient de leur grande fiabilité : les aérogénérateurs tournent en moyenne annuelle 98 % du temps pendant lequel les conditions de vent sont favorables. Outre les gains de productivité et la forte diminution du nombre de machine à installer, leur taille croissante a pour effet de diminuer leur vitesse de rotation (moins de 20 tours minute au-delà de 1 MW).

Le bruit émis par les aérogénérateurs a sensiblement diminué, en particulier les bruits d'origine mécaniques. De plus en optimisant la forme des pâles, les bruits d'origine aérodynamique ont eux aussi baissés fortement.

L'émergence de l'éolien en mer est due à la conjugaison de deux facteurs déterminants. Le premier tient à la qualité de la ressource éolienne en mer, tant en intensité qu'en persistance ainsi qu'à la maturité de la technologie terrestre (taux de disponibilité 99 %) ce qui a permis de franchir rapidement le pas vers des installations en mer (1981 parc de Vindeby au Danemark) moyennant des conditions favorables (faible bathymétrie, peu de houle et faible distance à la côte). Le deuxième facteur, plus récent, tient, dans certains pays, à la raréfaction des espaces d'accueil pour de nouveaux parcs éoliens terrestres. Le parc installé en mer aujourd'hui est peu important, mais la filière connaît depuis quelques années un regain d'activité.

5.2.7.2 Le marché

Fin 2004 plus de 47 300 MW de capacité éolienne fonctionnaient dans 50 pays du monde, dont plus de 28 000 MW dans l'UE. L'industrie éolienne mondiale a augmenté sa capacité installée totale de 20 % en 2004, soit 7976 MW dont 72 % des nouvelles installations ont eu lieu en Europe.

L'énergie éolienne a représenté 2,1 % du total de la capacité de production de l'UE en 2001. Cette part devrait augmenter à 10,6 % en 2010 et à 21 % en 2020.

La France avec une production 2005 estimée à 985 GWh, soit 1,69 % de la production de ses énergies renouvelables, représente une puissance installée de 918 MW.

5.2.7.3 Tissu industriel et effort de R&D

On enregistre actuellement une absence de structuration de la R&D française sur l'éolien. On peut quand même citer Armines / CEP à Sophia-Antipolis qui est le laboratoire le plus important dans ce domaine puis, le CEA de Cadarache, le GREAH au Havre, l'Ecole Centrale de Lille

La recherche française est présente sur les points clefs du déploiement de l'éolien que sont l'évaluation de la ressource et la prévision de la production. Elle est aussi présente sur des domaines essentiels pour le futur que sont les sciences liées à la mer.

La recherche française est bien intégrée dans les réseaux européens et sa valeur est reconnue car elle coordonne certains de ces projets. Elle est également présente sur des briques technologiques clefs des éoliennes comme les roulements, l'électrotechnique et l'aérodynamique.

Les acteurs industriels de l'éolien peuvent être classés en cinq catégories :

- Exploitant ou maître d'ouvrage : EDF Energies Nouvelles, MAIA EOLIS ;
- Maître d'œuvre : industriels chargés de la réalisation et de l'installation d'un parc CEGELEC, EDF Centre d'ingénierie DPI, Aerowatt, AtouVent, Eneria ;
- Bureaux d'études : monteurs de projets ayant qualifié la ressource éolienne CEGELEC ;
- Constructeurs d'éolienne : Vergnet (spécificité d'éoliennes cycloniques) ;
- Equipementiers : Leroy Sommer, Alstom, Rollix Defontaine ;

La France n'a pas d'industriels fabricants d'éolienne classique de premier rang.

De nombreux fabricants français sont reconnus au niveau international dans les secteurs des composants des aérogénérateurs comme la génératrice, les pales, le rotor, les couronnes utilisées pour la rotation du rotor ou l'orientation des pâles de la nacelle,

On estime aujourd'hui que le chiffre d'affaire de l'industrie éolienne en France en fourniture de composants est de l'ordre de 400 M€.

5.2.7.4 Perspectives de R&D

Il est essentiel de continuer encore la R&D pour permettre la réduction des coûts et anticiper le niveau de déploiement, mais aussi pour permettre les améliorations incrémentales ou l'émergence de nouveaux concepts (on est en effet encore loin d'une utilisation optimale de l'énergie mécanique du vent). L'amélioration de la connaissance des conditions extrêmes, de l'aérodynamisme pour une meilleure production d'électricité pourrait conduire à des modifications du design des éoliennes (hélice, ...).

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Amélioration de la technologie des pales	Spectre de charge, matériaux nouveaux plus léger et plus robuste, optimisation de la géométrie des pâles et du contrôle actif	MT
Conception de nouvelles turbines plus avancées, efficaces et légères	Nouveaux matériaux, recherche de structure innovante, de fondations avancées de tours auto érectiles	LT
Conception de nouveaux modes d'entraînement	Transmission gyroscopique variable, entraînement à vitesse variable sans électronique de puissance, amélioration des transformateurs, des prévisions de fatigue des roulements. Développement de générateur à entraînement direct Travail à moins de 5m/s	LT
Amélioration des rendements (>30 %)	Roulements à billes Convertisseurs	MT
Electronique de puissance avancée	Topologie des circuits, composants électroniques améliorés	CT
Maintenance réduite, pertes moindres et disponibilité améliorée	Systèmes pour ralentir l'encrassement des pâles ou facilité leur nettoyage et développement de système de détection de défaillance précoce (vibrations accélérations, ...)	MT

Réduction du bruit	Isolation phonique de la nacelle, amélioration des boîtes de vitesse, meilleur design de l'extrémité des pales	CT
Accès et transmission au réseau	Modélisation et gestion des systèmes électriques à haute tension nationaux et internationaux avec une forte pénétration éolienne, régulation de la puissance active et réactive	LT
Stockage/couplage	matériaux	MT
Recherche spécifique à l'offshore	Modèle hydrodynamique des charges de turbines éoliennes offshore (charges dues aux vagues), méthodes de construction de fondation et construction, réduction des problèmes de corrosion Adaptation ou développement de solutions pour l'accès et transmission au réseau	MT
Amélioration des prévisions	Développement d'outil de prévision de 48 heures à 7 jours	MT

Tableau 19– priorités de recherche énergie éolienne

5.2.8 Energie hydraulique

L'hydroélectricité résulte de la transformation en énergie électrique de l'énergie hydraulique, c'est-à-dire l'énergie fournie par une masse d'eau en mouvement.

5.2.8.1 Etat de l'art

Durant la première moitié du 20^{ème} siècle l'énergie hydraulique était la source principale mondiale d'électricité. Aujourd'hui elle est considérée comme une technologie mature qui contribue de manière significative à la fourniture d'énergie renouvelable de par le monde.

Du fait de sa grande flexibilité elle se positionne aujourd'hui comme une composante essentielle de la production d'électricité et la ressource la plus significative à court et moyen terme d'énergie renouvelable.

Il existe deux principaux types de centrales hydrauliques :

- Les centrales au fil de l'eau, qui ne disposent pas de capacité de stockage et produisent de l'électricité en fonction des apports en eau du moment. Leur production dépend donc directement du niveau des eaux et des précipitations. Ces centrales sont souvent situées en plaine sur des cours d'eau dont le débit est fort et ne fluctue pas trop au cours de l'année, comme le Rhin ou le Rhône ;
- Les centrales à réservoir (ou usines à lac) qui se caractérisent par leur grande capacité de stockage de l'eau, de quelques millions de m³ à plusieurs milliards de m³. Ce type de centrale est souvent construit dans des massifs montagneux, sur des cours d'eau dont le débit est variable en fonction des précipitations et des saisons. La construction de ces barrages permet de lisser une partie des variations de précipitations en stockant de l'eau et de faire correspondre l'offre de l'électricité à la demande.

Un des grands avantages de la centrale hydraulique est sa grande flexibilité d'utilisation. Alors qu'il faut 24 heures de mise en route pour une centrale nucléaire (à froid) contre 12 heures pour une centrale thermique, il suffit de quelques minutes pour mettre en ligne un barrage de retenue.

Le principal problème est la précipitation. Quel que soit le type de centrale, l'impact de la pluie sur les ressources disponibles est important. Une sécheresse ponctuelle aura un impact direct sur la production au fil de l'eau. Dans le cas des centrales à retenue, si le niveau des réserves reste suffisant, il n'y aura pas d'impact, en revanche une sécheresse prolongée peut avoir un impact important sur leur mode même d'utilisation.

5.2.8.2 Marché

En France

La production d'électricité d'origine hydraulique est estimée à 53 210 GWh représentant 91,44 % de la production d'électricité des énergies renouvelables en France.

La production hydraulique a fortement varié lors des années sèches de 1996 et 2003. La production de l'année 2002 a souffert d'un grave déficit pluviométrique de l'hiver 2001/2002, même s'il a été comblé par des pluies en quantité exceptionnelle à l'automne suivant. En 2003 les volumes hydrauliques sont restés bas, les barrages ayant souffert de la canicule de l'été. La France a aussi souffert d'un déficit de précipitations en 2005 entraînant une baisse de 16 %.

En Europe

Plus de 16 % (500 TWh) de l'électricité produite en Europe est d'origine hydraulique, ce qui en fait la troisième source de production d'électricité derrière l'électricité thermique fossile (charbon, fuel, gaz) et le nucléaire.

Ce chiffre masque cependant une grande hétérogénéité entre les différents producteurs : l'hydroélectricité représente 99 % de la production électrique en Norvège contre 0,07 % au Danemark ou 0,1 % aux Pays-Bas.

5.2.8.3 Perspectives de R&D

L'énergie hydraulique est bien établie, mais il existe encore des opportunités pour améliorer son développement global.

Il n'est pas nécessaire d'aller vers des ruptures technologiques ou des changements radicaux de développement des ressources pour faire évoluer l'hydroélectricité. C'est plus le domaine de l'acceptation par le public et de l'amélioration des techniques existantes qui seront porteurs d'évolution.

Quatre axes de recherche :

- Promouvoir le développement de l'hydraulique par la mise en place de méthodes pour évaluer les bénéfices apportés par cette En R et objectiver les débats sur la petite hydraulique ;
- Protection des ressources piscicoles ;
- Optimiser la ressource : méthodes de suivi et de mesure des débits, suivi des sédiments ;
- Intégrer d'autre En R avec l'hydraulique comme l'éolien ou des systèmes hybrides incluant l'hydrogène.

5.2.9 Energies marines

5.2.9.1 Etat de l'art

La mer est un milieu riche en énergie, exploitable sous diverses formes.

- L'énergie houlomotrice ou la récupération de l'énergie de la houle et des vagues,
- L'énergie des courants de marées : les marées provoquent de puissants courants qui sont concentrés en certains endroits près des côtes, où ils peuvent être captés par des éoliennes sous-marines appelées hydroliennes,
- L'énergie des courants océaniques,
- L'énergie thermique : l'océan et la mer sont de gigantesques capteurs solaires. Dans la zone intertropicale de l'océan la différence de température entre la surface et le fond dépasse 20 °C. Ce phénomène peut être exploité pour convertir une partie de la chaleur de l'eau chaude en énergie

électrique,

- L'énergie marémotrice : le flux et le reflux de la marée sont utilisés pour alternativement remplir ou vider un bassin de retenu en actionnant des turbines incorporées dans le barrage créant cette retenue,
- La pression osmotique : une membrane semi-perméable mise au contact avec de l'eau douce sur une face et de l'eau de mer sur l'autre face est soumise à une pression osmotique. Ce phénomène peut être mis à profit pour récupérer de l'énergie,
- La biomasse marine : valorisation énergétique par gazéification, fermentation ou combustion des algues et du phytoplancton.

L'exploitation de toutes ces énergies est possible. Certaines ont déjà commencé en divers endroits dans le monde, à des stades divers de développement.

Leur exploitation n'implique pas d'apports anthropiques dans la biosphère, contrairement à la combustion du fuel fossile, mais seulement des perturbations de flux naturels d'énergie et de la matière.

Les conséquences de l'exploitation intensive des énergies marines sous toutes leurs formes sont encore inconnues et un effort de recherche proportionné à leur développement sera nécessaire pour en cerner les limites « durables ».

5.2.9.2 Marché

Actuellement on ne compte que trois grands systèmes industriels de barrages à marées représentant une capacité de production de 260 MW dans le monde. L'usine marémotrice de la Rance (inaugurée en 1966) étant la principale avec 240 MW de puissance. Elle représente à elle seule 90 % de la production mondiale, les autres réalisations étant au Canada (20 MW) et en Chine (5MW). Il en existe aussi plusieurs de taille modeste en Russie (400 kW).

Une grande diversité de systèmes voit actuellement le jour, en particulier au Royaume –Uni. Ils concernent l'énergie des vagues (10 projets) et des courants marins (9 projets) mais n'en sont encore qu'à la phase de test de pilotes ou de prototypes préindustriels. Les puissances concernées sont de quelques centaines de kW pour les courants de marées, un seul projet à 1 MW est prévu pour 2007. L'énergie des vagues génère des puissances plus importantes : 3 projets vont de 2 à 7 MW.

L'environnement marin est un environnement très agressif pour les matériels du fait de l'énergie mise en jeu (vagues, vagues chargées d'éléments solides, courants, tempêtes, ...), des caractéristiques chimiques du milieu salin, de la faune et de la flore existantes. Les matériels doivent être conçus pour ces contraintes. Dans le même temps les technologies doivent aussi être compétitives dans une économie de base et par rapport aux contraintes de l'environnement avec des critères de fiabilité, sécurité, bas coût, simplicité et faible impact environnemental.

5.2.9.3 Position des industriels français et de la R&D

Actuellement il n'y a qu'un seul consortium industriel (Hydrohélix et SAIPEM, ...) qui essaie de rassembler des fonds pour réaliser un démonstrateur d'hydrolienne en France.

Au niveau laboratoire deux réalisations sous forme de maquette sont en cours au LEGIR à Grenoble le projet HARVEST hydrolienne à axe vertical pour l'utilisation des courants et à l'Ecole Centrale de Nantes le projet Searev pour la conversion du mouvement des vagues en énergie.

5.2.9.4 Perspectives de R&D

Concernant la R&D les efforts doivent porter sur chaque concept pour qu'il puisse atteindre son potentiel attendu. Chaque concept a sa propre liste de verrous technologiques à lever. Néanmoins ces barrières peuvent être groupées en quatre champs technologiques, les vagues, les courants de marée, la biomasse et les gradients thermique et de salinité.

Un nombre de barrières non techniques existent aussi qui peuvent ralentir ou stopper l'évolution technologique. Ce sont les questions de partage de la ressource, de prévisions, d'outils de simulation,

de test et de mesure ainsi que l'impact environnemental.

Les technologies de l'énergie des océans doivent résoudre deux problèmes essentiels : faire la preuve de la conversion des énergies marines en énergies exploitables et résoudre les risques techniques liés à la dureté de l'environnement.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
MAREMOTRICE	Inventaire précis du potentiel Réévaluer les études d'impacts avec les nouvelles technologies disponibles	
VAGUES Valider les différents concepts en cours (à la côte ou en pleine mer) Etude de l'impact environnemental	Modélisation numérique en mer sévère Développement de nouveaux composants spécifiques (accumulateurs, génératrices électriques, ...) Réalisation de démonstrateurs et tests in situ Etude de rendement stockage Optimisation des temps de fonctionnement Maintenance simplifiée Validation des connections au réseau terrestre Production d'hydrogène Etude des conflits d'usage et de l'utilisation de la ressource	MT MT CT MT LT MT MT MT LT CT
COURANTS Valider les différents concepts en cours Etude de l'impact environnemental	Modélisation numérique avec interaction houle-courant-matériel Réalisation de démonstrateurs et tests in situ Etude de rendement Etude de l'encrassement Etude des effets de sillage Optimisation des temps de fonctionnement Maintenance simplifiée Validation des connections au réseau terrestre stockage Etude des conflits d'usage et de l'utilisation de la ressource	CT CT CT MT MT MT MT MT LT CT
GRADIENTS de salinité / thermique	Reprendre les travaux commencés en Polynésie	LT
BIOMASSE marine	Récupérable de façon acceptable écologiquement et économiquement	LT

Tableau 20 – priorités de recherche énergies marines

5.3 Energies fossiles

5.3.1 Gisements d'hydrocarbure et raffinage

Dans un contexte de tensions croissantes entre l'offre et la demande, où les réserves de pétrole brut et de gaz naturel se concentrent dans les mains d'un nombre de plus en plus limité d'acteurs, le secteur parapétrolier français contribue à la sécurité d'approvisionnement de l'Europe et de la France.

L'industrie fait également face à une complexification grandissante des systèmes nécessaires à la recherche et à la production des hydrocarbures (avec l'exploitation des hydrocarbures dans des conditions nécessitant de plus en plus d'innovations technologiques, comme par exemple, l'exploitation en eaux profondes).

5.3.1.1 Marché et acteurs

L'industrie para-pétrolière française emploie directement plus de 66 500 personnes et a réalisé en 2005 un chiffre d'affaires de 19 milliards d'euros (dont 90% à l'étranger). Dans son secteur, elle occupe le rang de deuxième exportateur mondial derrière les Etats-Unis. Le chiffre d'affaires 2005 représente une hausse de 12 % par rapport à 2004.

Le marché du secteur parapétrolier est principalement marqué par les évolutions suivantes :

- Les fluctuations importantes du prix du pétrole rendent l'activité de ce secteur très cyclique ;
- Une concurrence de plus en plus intense notamment en raison du déclin de l'activité en Mer du Nord et de l'attitude des pouvoirs publics norvégiens et britanniques qui incitent de plus en plus leurs entreprises parapétrolières respectives à exercer leurs activités en dehors des frontières nationales. En parallèle, on assiste au cours de la période récente au développement d'entreprises asiatiques jouant sur la faiblesse de leurs coûts pour s'imposer dans le paysage mondial. Dans nombre de pays étrangers, la recherche d'entreprises concurrentes est fortement aidée par les gouvernements et/ou par des compagnies nationales disposant d'un monopole de production (par exemple le DOE aux Etats-Unis ou le DEMO en Norvège) ;
- Un transfert des responsabilités relatives à la conduite des grands projets de mise en exploitation d'hydrocarbures des compagnies pétrolières vers leurs sous traitants ;
- Pour faire face à ces conditions, les sociétés parapétrolières cherchent à accéder à une main d'œuvre à plus bas coût à l'étranger et/ou mettent l'accent de façon croissante sur la technologie non seulement dans l'optique d'une préservation de leur part du marché mondial, mais également afin de faire face à l'accroissement inéluctable de la demande en hydrocarbures dans le futur ainsi qu'à l'épuisement progressif des réserves conventionnelles qui vont nécessiter le recours à des solutions technologiques nouvelles pour assurer l'exploitation de nouvelles ressources.

La bonne santé du secteur parapétrolier découle de la croissance continue des investissements en exploration-production (170 milliards de dollars en 2005, soit une hausse de 13 % par rapport à 2004), dans un contexte de prix du pétrole et du gaz records (55 \$ par baril - Brent IPE - en moyenne contre 38 \$ en 2004). Ces investissements concernent principalement trois grands secteurs d'activité : la géophysique (augmentation de 17 % de l'activité sismique entre 2004 et 2005), le forage (hausse de 9 % sur un an du nombre de puits forés) et la construction d'équipements de production offshore (progression de 7 % du marché en 2005).

Concernant le raffinage, l'année 2004 a été marquée par une nette amélioration des marges qui s'est poursuivie en 2005. Dans ce contexte, les résultats de l'activité raffinage des compagnies pétrolières pour l'exercice 2004 sont apparus en hausse significative par rapport à 2003 et ceux du premier semestre 2005 confirment cette tendance. En ce qui concerne la *pétrochimie*, en dépit de la hausse continue du prix du naphtha, le rétablissement des marges a permis un renversement de tendance en 2004 et une nette amélioration des résultats financiers des sociétés, qui devrait se poursuivre en 2005

selon les résultats nets des sociétés publiés pour le premier semestre. Malgré cet environnement favorable, les investissements sont restés modestes aussi bien dans le raffinage que dans la pétrochimie, notamment en nouvelles capacités, mais de nombreux projets sont prévus pour les cinq prochaines années.

5.3.1.2 Tissu scientifique et industriel et effort de R&D en France

Le tissu scientifique et industriel français du secteur parapétrolier intègre des centres de recherche publics (IFP, BRGM, IFREMER), des universités et des sociétés privées de toutes tailles, de la PME¹⁸ au grand groupe international implanté sur plusieurs sites français voire étrangers. Implantée dans plusieurs régions en France, cette industrie contribue au développement de l'activité économique et industrielle locale. Outre l'Ile de France, les acteurs du secteur parapétrolier sont également présents en Rhône-Alpes, Provence-Alpes-Côte-D'Azur, Pays de Loire, Haute-Normandie, Nord Pas de Calais, Aquitaine ou encore Lorraine.

L'ensemble regroupe des métiers très différents : la géophysique, l'ingénierie de réservoir, l'ingénierie de puits, le forage, les services autour du puits, le contrôle des écoulements, la construction et la conception de conduites, l'électricité et l'instrumentation, la mécanique, l'architecture navale, les opérations marines, l'océanographie, le génie civil, l'ingénierie, la fabrication de catalyseurs, la chaudronnerie ... etc.

Ces dernières années, on observe une concentration des acteurs à deux niveaux. D'une part, les sociétés pétrolières se sont regroupées diminuant ainsi le nombre d'acteurs et donnant lieu à des compagnies de taille très importante (Exxon et Mobil, BP et Amoco et Arco, Total et Fina et Elf, Conoco et Philips, Chevron et Texaco) et d'autre part des sociétés parapétrolières de taille de plus en plus importante se sont formées, par des fusions absorptions, afin qu'elles soient capables de répondre aux besoins des compagnies pétrolières (ainsi, récemment, CGG a racheté la société américaine Veritas DGC).

Enfin, il y aussi lieu de noter que les avancées de cette industrie permettent de faire progresser la science et la technologie dans de nombreux autres secteurs. Ainsi :

- Les deux pôles de compétitivité français associés aux métiers de la mer (régions Bretagne et PACA) associent étroitement différents acteurs du secteur para pétrolier spécialisés dans l'offshore ;
- Le récent (2005) prix Nobel de Chimie a été attribué à un scientifique français, M. Yves Chauvin, dont les travaux, alors qu'il était chercheur à l'IFP dans les années 70, ont ouvert un champ d'applications industrielles très important, notamment les procédés Alphabutol et Dimersol qui sont des succès commerciaux remarquables sur le marché international et dans le domaine de la catalyse ;
- Une des « Nouvelles Technologies de l'Energie », le captage et le stockage géologique du CO₂ (voir le chapitre ad hoc) s'appuie largement sur les technologies développées par le secteur para pétrolier.

5.3.1.3 Perspectives de R&D

Les pouvoirs publics soutiennent la R&D dans le domaine parapétrolier au travers des deux vecteurs principaux dont ils disposent : l'Institut Français du Pétrole (IFP) et le Réseau de recherche sur les technologies pétrolières et gazières (RTPG). ».

Dans le domaine de l'exploration production, l'objectif sera de renouveler les réserves en rendant accessibles les pétroles « à haut contenu technologique » dont seul le développement permettra de repousser le « pic de production ».

Cet objectif passe par l'identification de nouvelles découvertes (pétrole et gaz naturel) difficiles à mettre en évidence avec les technologies actuelles, l'amélioration des taux de récupération

¹⁸ Le Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières (voir plus loin) a aidé 70 PME du secteur parapétrolier français, au cours des 3 dernières années

(actuellement de l'ordre de 35 % en moyenne au niveau mondial) et la mise en exploitation des ressources non conventionnelles (offshore ultra profond, bruts extra lourds, sables asphaltiques, etc.).

Concernant le raffinage et la pétrochimie, le contexte dans lequel les industries évolueront au cours de ces prochaines années sera dominé par quatre tendances.

Premièrement, la croissance de la demande pétrolière mondiale nécessitera d'augmenter les capacités de production des raffineries, particulièrement en Asie du Sud-Est et en Amérique latine. En ce qui concerne la pétrochimie, les principales préoccupations concernent le renchérissement des matières premières (et notamment du naphta), ainsi que la croissance de la demande en propylène qui, dépassant celle de l'éthylène, nécessitera la mise à disposition de procédés spécifiques adaptés.

Deuxièmement, la demande en fuels lourds va diminuer et en même temps s'orienter vers des fuels très basse teneur en soufre. Des investissements lourds en unités d'hydrodésulfuration et de conversion (300 à 500 M€ par unité) devront donc être engagés, notamment en Europe où ils concerneront un nombre de sites limités (de l'ordre de 10 % des raffineries européennes). Ces unités nécessiteront l'utilisation de quantités plus importantes d'hydrogène, générant des émissions de CO₂ croissantes dont il faudra éventuellement envisager le captage et le stockage. Parallèlement, la demande en carburants va augmenter, se traduisant par une accélération des déséquilibres entre région, avec, par exemple, une croissance persistante aux États-Unis du déficit en essence, tandis que le déficit en gazole européen croîtra du fait de la diésélisation du parc automobile. Des incertitudes demeurent à long terme sur ces tendances en fonction d'une part du rythme de pénétration des biocarburants et des véhicules hybrides, d'autre part de l'impact du prix élevé du pétrole brut sur la demande.

Troisièmement, l'intervention des ressources non conventionnelles va croître. Le traitement des bruts issus de ressources non conventionnelles (bruts extra lourds, schistes bitumineux, etc.) nécessiteront des schémas et technologies spécifiques pour l'upgrading, le pré-raffinage sur site ou le raffinage dans les pays de consommation.

Quatrièmement, un durcissement des législations existantes et la mise en place de réglementations et spécifications supplémentaires sont à prévoir dans les prochaines années. Les rejets des polluants autorisés, issus des raffineries ou des véhicules, seront alors davantage limités et contraints, alors que la composition des produits fabriqués par les raffineries se diversifie et se complexifie. Il est donc important de développer des procédés minimisant l'impact environnemental global de la fabrication et de l'usage des carburants. Par ailleurs, l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto et la mise en place dans l'Union Européenne de la directive sur le marché des permis d'émission de CO₂, auront une influence structurante sur l'industrie du raffinage et de la pétrochimie.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
<p>Exploration et production</p> <p>Meilleure évaluation des systèmes pétroliers pour découvrir de nouveaux gisements et augmenter le taux de succès en exploration.</p> <p>Augmenter le taux de récupération dans tous les gisements en production, aujourd'hui et dans le futur.</p> <p>Mise en production d'accumulations « difficiles » grâce à l'apport de technologies innovantes.</p>	<p>Amélioration de l'imagerie sismique et de la modélisation de bassin : zones matures, zones frontières (Arctique), très grand offshore (au-delà de 3 000 mètres d'eau) et zones de piémont</p> <p>Amélioration de la simulation dynamique, du monitoring des gisements (grâce à la géophysique et la sismique 4D), et de la quantification des incertitudes portant sur l'ensemble des données.</p> <p>Mise au point de nouvelles technologies de production, du transport et du raffinage (procédés de conversion profonde), tout en protégeant l'environnement (captage et réinjection du CO₂).</p>	<p>CT/MT/LT</p>

<p>Raffinage et pétrochimie Accroître l'efficacité énergétique et environnementale des technologies mises en œuvre tout au long de la chaîne pétrolière afin de prolonger l'utilisation aujourd'hui incontournable des hydrocarbures sur ces usages spécifiques, tout en préparant l'arrivée de nouveaux substituts.</p>	<p>La conversion</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mise au point de technologies (procédés et catalyseurs) d'hydroconversion pour les bruts lourds, les résidus et les distillats : raffinage des bruts conventionnels, pré-raffinage (ou même le raffinage local) de bruts conventionnels, raffinage sur champs des bruts lourds ou asphaltiques. - Accroissement des efforts sur l'hydrocraquage. - Amélioration de la sélectivité du craquage catalytique vers des bases oléfiniques pour la pétrochimie (propylène) et des intermédiaires permettant de synthétiser des composants pour gazole. <p>La production de carburants</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mise au point de nouveaux catalyseurs d'hydrotraitement des essences de craquage catalytique. - Dans le domaine du reformage des essences, sélectivité des catalyseurs vers l'hydrogène et réduction de la production de benzène. - Dans le domaine de la production de gazoles et de kérosènes, mise au point de catalyseurs à activité et stabilité augmentées. - Carburants avancés : recherche sur les spécifications de carburants présentant le meilleur rapport coût/bénéfice, et pour les systèmes de post-traitement (pièges à NOx, filtres à particules, etc.). - La production d'intermédiaires pétrochimiques : recherche sur la production et la purification des oléfines (monomères) et des aromatiques (BTX et LAB) 	<p>CT/MT/LT</p>
--	--	-----------------

Tableau 21– priorités de recherche énergies fossiles

5.3.2 *Gaz naturel et Charbon*

5.3.2.1 Le gaz naturel

Les défis de ces prochaines années consisteront d'une part, à fournir aux producteurs des technologies de liquéfaction plus performantes, d'autre part, à réaliser des unités de transformation du gaz naturel en carburants liquides (GTL) minimisant les investissements et les coûts opératoires.

La recherche devrait répondre à deux défis majeurs : la production du gaz naturel et la performance énergétique de toute la chaîne GNL (liquéfaction, transport maritime, re-gazéification).

- La production de gaz naturel.

Il s'agit à la fois d'améliorer les taux de récupérations des champs actuels (comme cela est mentionné dans le document), mais aussi développer des nouvelles technologies pour exploiter les gisements non exploités aujourd'hui : gisements très profonds, éloignés des côtes, et au-delà les gisements non

conventionnels de gaz naturel : champs marginaux / « stranded gas », hydrates et éviter le torchage du gaz naturel sur champs (Les champs marginaux étant ici définis comme des gisements situés trop loin d'une infrastructure de transport (pipeline) ou trop loin d'un marché pour que le transport de gaz soit économiquement viable).

Selon International Energy Outlook, les réserves mondiales de gaz étant de 6076 trillions (soit 172 Tm³), les gisements marginaux seraient estimés à 3000 trillions soit (85 Tm³) soit une part de 49 %. Des solutions alternatives au transport du gaz naturel par GNL devront être étudiées telles que le transport sous forme de gaz comprimé ou à plus long terme sous forme d'hydrates.

- La performance énergétique de toute la chaîne GNL (liquéfaction, transport maritime, re-gazéification)

Le GNL concourt à garantir l'approvisionnement de l'Europe en gaz naturel sur le long terme de par la diversification des zones géographiques des sources. On peut s'attendre à un doublement à minima de la flotte mondiale de méthaniers à horizon 2020 selon la plate-forme européenne Waterborn.

Les enjeux pour les usines de liquéfaction sont principalement l'amélioration des rendements énergétiques du procédé de liquéfaction, l'intégration des usines dans des environnements extrêmes et les besoins de marinisation des installations.

Il apparaît de plus en plus difficile de doter les côtes européennes de terminaux méthaniers pour des raisons environnementales et d'acceptabilité des citoyens. Les infrastructures GNL off-shore constituent une réponse industrielle à ces préoccupations. Si la conception et l'utilisation de barges sont parfaitement maîtrisées aujourd'hui, il est nécessaire de poursuivre les recherches dans les domaines suivants : transfert du GNL entre le méthanier et la barge en toutes conditions de temps et de mer, conduite longue distance de GNL pour rejoindre les unités de re gazéification et enfin recherche de solutions alternatives de stockage aux réservoirs GNL actuels.

Pour garantir la sécurité des installations GNL existantes et futures, particulièrement des systèmes off shore, il sera nécessaire de disposer de capteurs robotisés d'investigation des matériels GNL dans les conditions opératoires. Les terminaux méthaniers devront aussi avoir des rendements énergétiques améliorés : la récupération des frigories des terminaux est la voie la plus pertinente à explorer.

Enfin, les méthaniers devront présenter de plus grandes capacités tout en restant adaptés au gabarit et contraintes des voies maritimes et des ports. Une Conception modulaire permettra de maintenir en compétitivité de la technologie française.

Enfin, sur l'ensemble GNL, la conception devra intégrer la recyclabilité des matériaux et matériels.

5.3.2.2 Le charbon

Le charbon constitue la principale ressource en énergie fossile disponible dans le monde. Aujourd'hui principalement utilisé pour la production d'électricité, sa conversion chimique permettra d'obtenir des carburants, des combustibles et des bases pour la pétrochimie.

Le charbon fera partie du mix énergétique futur car abondant, notamment dans les pays où les besoins en énergie vont en croissant et géopolitiquement bien réparti. Il faudra unifier les efforts publics / privés de recherche dans les études et opérations de démonstration visant à :

- améliorer le rendement des technologies existantes et réduire leurs émissions ;
- mettre au point les technologies de captage et de stockage du CO₂ sans lesquelles l'utilisation de cette énergie primaire ne sera pas soutenable pour l'environnement (cf. chapitre 5.3.3 sur le captage et le stockage du CO₂).

Les thèmes majeurs de R&D visent à :

- développer des procédés de liquéfaction par voie directe (liquéfaction) en synergie avec les procédés de conversion par hydrotraitement des résidus pétroliers (possibilité de co-traitement). Les enjeux sont la réduction des coûts en particulier via la formulation des catalyseurs et

l'amélioration de la qualité des effluents (soufre, azote, polynaphténoaromatiques). Cette voie présente l'intérêt d'avoir un rendement matière relativement élevé (de 3 à 5 barils de liquides par tonne de charbon, selon que l'hydrogène nécessaire est coproduit ou "importé", contre 2 pour la voie indirecte) ;

- développer la voie indirecte (passage par le gaz de synthèse) qui permet de d'envisager aussi bien la production de carburants liquides de qualité (synergie avec la filière GTL au niveau des procédés). Cette voie offre l'avantage de pouvoir traiter toutes les catégories de charbon ;
- travailler sur les aspects intégration énergétique et émissions de CO₂ : développement de nouvelles chaudières intégrant le captage du CO₂ ; transformation des chaudières existantes permettant le captage du CO₂ émis (cf. les travaux de R&D sur le thème du captage du CO₂ du chapitre 5.3.3).

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
<p>Accroître l'efficacité énergétique et environnementale</p> <p>-utilisation du captage et du stockage du CO₂</p> <p>-réduction des gaz à effet de serre</p>	<p>Le gaz naturel</p> <p>Amélioration du procédé GTL pour la production de carburants synthétiques sans soufre ni aromatiques obtenus par synthèse <i>Fischer-Tropsch</i>.</p> <p>Amélioration de l'efficacité et des coûts des technologies de liquéfaction.</p> <p>Le charbon</p> <ul style="list-style-type: none"> - Développement de procédés de liquéfaction par voie directe (liquéfaction) en synergie avec les procédés de conversion par hydrotraitement des résidus pétroliers (possibilité de co-traitement). - Développement de la voie indirecte (i.e. passage par le gaz de synthèse) qui permet d'envisager la production de carburants liquides de qualité (synergie avec la filière GTL au niveau des procédés). - Développement de technologies de captage de CO₂ industriel (cf. chapitre suivant) 	<p>CT/MT/LT</p> <p>CT/MT/LT</p>

Tableau 22– priorités de recherche gaz naturel et charbon

5.3.3 Captage et stockage géologique du gaz carbonique

La combustion de produits fossiles, extraits du sous-sol, provoque l'envoi dans l'atmosphère de grandes quantités de gaz carbonique. Pour réduire ces émissions il est nécessaire de :

- limiter les besoins en combustible en améliorant l'efficacité énergétique ;
- substituer aux énergies fossiles des énergies non productrices de gaz à effet de serre (renouvelables et nucléaires).

Toutefois, au cours des prochaines décennies, les combustibles fossiles continueront à jouer un rôle prédominant au plan mondial, par exemple pour assurer la production d'électricité dans des zones qui

disposent de réserves de charbon abondantes (comme la Chine ou l'Amérique du Nord). Le développement de technologies de captage et stockage du CO₂ (CSC), en complément de la maîtrise des consommations et du développement des énergies sans carbone, est donc nécessaire à court et moyen terme. Il s'agit de capter, de transporter, d'injecter puis de stocker (sous terre, en profitant des nombreux confinements naturels qu'offre le sous-sol¹⁹) le gaz carbonique pendant une durée suffisamment longue pour limiter l'augmentation de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère et l'ampleur du changement climatique.

Le captage et le stockage du gaz carbonique pourraient ainsi représenter la « soupape de sécurité » des politiques mondiales de lutte contre l'effet de serre. Rapidement disponibles, ils pourraient être acceptés par les pays les moins disposés - jusqu'à présent - à réduire leurs consommations énergétiques et la part des énergies fossiles dans ces consommations. Ils permettraient de donner à l'humanité le temps nécessaire pour migrer vers une civilisation plus économe et « sans carbone ».

5.3.3.1 Marché mondial

Le marché actuel du captage et du stockage géologique du gaz carbonique est quasi inexistant, les pouvoirs publics n'ayant ni mis en place d'incitations économiques suffisantes pour financer le captage ni décidé de l'encadrement réglementaire du stockage géologique.

Il existe déjà toutefois des pilotes de stockage (exemple : un million de tonnes de CO₂ par an sont injectées depuis 10 ans en Mer du Nord sur le site de Sleipner en Norvège).

Il existe aussi des pilotes ou projets de pilotes de captage. Ainsi le 15 mars 2006, le premier pilote européen de captage de gaz carbonique sur une centrale électrique au charbon a été inauguré au Danemark ; seule une faible fraction des gaz émis est captée dans le cadre de ce projet communautaire de R&D dont l'IFP est leader.

De nombreux gouvernements soutiennent financièrement ces démarches. Ainsi, l'administration américaine a annoncé un budget de l'ordre du milliard de dollars.

Il est délicat d'avancer aujourd'hui une estimation du marché futur lié au CSC puisque celui-ci est et restera fortement dépendant des décisions politiques notamment sur les engagements post-Kyoto. Toutefois, on peut noter (source : GIEC – 2005) qu'il existe aujourd'hui, dans le monde, environ 8000 sites industriels émettant chaque année plus de 100 000 tonnes de gaz carbonique par an. Environ 5000 sont des centrales électriques. Sur une période de 20 ou 30 ans, les investissements additionnels liés à la mise en œuvre de technologies de capture et de stockage pourraient donc s'élever à plusieurs centaines de milliards d'euros au niveau mondial (dont une grande partie dans des pays comme l'Inde ou la Chine, où est construite une grande partie des nouvelles usines et centrales électriques).

Indépendamment de la problématique de la lutte contre l'effet de serre, l'injection souterraine de gaz est une activité économique importante. Dans le monde, plus de 150 milliards de m³ (dont 10 milliards de m³ en France) de gaz naturel sont injectés ou stockés dans des stockages géologiques (450 stockages et 80 années d'expérience aux États-unis) :

- L'injection de gaz carbonique pour améliorer la récupération de pétrole est pratiquée depuis plus de 30 ans en Amérique du Nord (près de 30 millions de tonnes injectées par an aux États-unis) ;
- La ré-injection de gaz acides (H₂S et CO₂) résultant de l'extraction d'hydrocarbures est pratiquée sur plus de 60 sites en Amérique du Nord.

5.3.3.2 Tissu scientifique et industriel français et efforts de R&D

Depuis plusieurs années, les pouvoirs publics financent des projets sur le thème du CSC, notamment en s'appuyant sur le BRGM, sur l'IFP, sur le Réseau de recherche des Technologies Pétrolières et Gazières (RTPG) ou sur l'ADEME.

L'année 2005 a été marquée par un accroissement du soutien du gouvernement à cette thématique :

¹⁹ Une tonne de gaz carbonique occupe 509 m³ à des conditions de surface (20°C et 1 bar). La même quantité de CO₂ n'occupe plus que 1,39 m³ à un kilomètre de profondeur (60°C et 102 bar).

- l'Agence Nationale de la Recherche a consacré plus de 9 millions d'Euros au captage et au stockage géologique du CO₂ ;
- L'IFP et le BRGM ont placé ce sujet parmi leurs toutes premières priorités, dans le cadre de leurs nouveaux contrats d'objectifs ;
- Le soutien de l'ANR a été proposé ; il sera certainement précieux pour faciliter le financement de projets de taille industrielle.

Aujourd'hui les recherches conduites en France concernent toutes les applications possibles (centrales électriques, raffineries, cimenteries, aciéries, ...) et tous les maillons du CSC (captage, transport et stockage géologique).

Le tissu industriel et scientifique français est constitué d'organismes de dimension internationale, souvent leaders de leur spécialité.

Les acteurs français sont de diverses natures :

- centres publics de recherche. L'IFP, le BRGM et l'IPGP consacrent ainsi une partie significative de leur budget à cette thématique, mais on peut citer aussi le CNRS, les universités, Armines, ... qui travaillent dans le CSC ;
- industriels issus de l'important secteur para pétrolier (fournisseurs d'équipements et de services pour les compagnies pétrolières et gazières) français qui, de par leur expertise développée dans l'industrie pétrolière, trouveront des activités complémentaires à leurs activités traditionnelles et pourront jouer un rôle majeur dans la fourniture des équipements et services associés à ces technologies, principalement à l'exportation ;
- industriels issus d'autres secteurs, comme Alstom et Air Liquide, pour ce qui concerne le captage et le transport du CO₂ ;
- utilisateurs actuels et futurs (production d'électricité, sidérurgie, raffinage, cimenterie principalement) : EDF, Gaz de France, Total, Arcelor, Lafarge

Depuis 2001, ces acteurs se trouvent au sein du club CO₂, sous la présidence de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). C'est un lieu d'échange, d'information et d'initiatives entre ses membres (les acteurs concernés du monde industriel et de la recherche) dans le domaine des études, de la recherche et du développement technologique en matière de captage et de stockage du CO₂.

Les équipes françaises de recherche sont aujourd'hui reconnues sur le plan mondial pour leurs compétences dans le domaine du CSC. Elles participent en tant que contributeurs importants à plusieurs projets européens et ont une implication forte dans les projets du 6^{ème} PCRD traitant du CSC (CASTOR, ENCAP, le réseau CO₂GeoNet, ... etc.).

Au-delà de leur implication dans les projets de recherche, les chercheurs français s'impliquent également dans les groupes de réflexions portant sur le domaine du CSC. Ainsi, par exemple, l'IFP copréside la plate-forme technologique « Zero Emission Fossil Fuel Power Plant » qui jouera un rôle clé dans l'orientation du programme de recherche de l'union européenne dans le cadre du 7^{ème} PCRD.

Enfin, le CSC est une des priorités du pôle de compétitivité « Chimie-Environnement Rhône-Alpes » ainsi qu'une priorité du projet de pôle Avenir – Energie - Environnement (Région Aquitaine).

5.3.3.3 Partenariats internationaux

Le thème du captage et du stockage géologique du CO₂ (CSC) est aujourd'hui très présent dans les discussions nationales et internationales relatives à la lutte contre le changement climatique.

Les Etats Unis d'Amérique, le Canada, l'Australie et le Japon, mais aussi la Norvège, la Grande Bretagne et l'Allemagne, ont fait du développement de ces technologies une nouvelle grande priorité nationale dans le domaine de la lutte contre l'effet de serre, sans préjudice des deux autres priorités que sont l'amélioration de l'efficacité énergétique et le développement des énergies non fossiles. Une stratégie spécifique a été définie et publiée dans chacun de ces pays.

La Commission Européenne, de son côté, a mis en place une « plate forme technologique » relative aux centrales thermiques à énergies fossiles « zero-émission ». Cette plate forme s'est fixé l'objectif suivant : faire en sorte que toutes les nouvelles centrales thermiques à énergies fossiles qui démarrent dans l'Union à partir de 2020 n'émettent plus (ou quasiment plus) de CO₂. Les feuilles de route associées à cet objectif sont en cours d'élaboration (la cohérence entre le programme français et le programme européen devra être vérifiée le moment venu).

La généralisation de la mise en œuvre de ces technologies nécessite en effet quelques efforts de R&D. Il s'agit notamment de rendre le captage et le transport du gaz carbonique moins coûteux et de garantir la maîtrise du stockage géologique sur le long terme.

L'Union Européenne comme les pays précités sont toutefois conscients que les perspectives de développement du CSC posent des questions qui ne sont pas des questions de nature purement scientifique ou technologique.

5.3.3.4 Perspectives de R&D

Une perspective à moyen terme est la mise en place, en France, d'installations pilotes et de démonstration. Ces installations, véritables catalyseurs des efforts nationaux, serviront en particulier à :

- améliorer la communication entre les équipes de R&D, facilitant en particulier le transfert de savoir des centres de recherche publics vers l'industrie et une meilleure appréhension de la problématique industrielle par ces centres ;
- la réalisation d'une vitrine du savoir-faire national en vue de faciliter l'exportation de biens et de services ;
- la concertation.

La réalisation de telles installations ne peut être, toutefois, considérée comme l'aboutissement de toutes les autres actions. Divers travaux essentiels doivent être poursuivis en parallèle, portant par exemple sur la réduction des coûts de captage et de transport et la mise au point de méthodes de modélisation, de confinement et surveillance du stockage sur le long terme, dans des environnements géologiques diversifiés.

L'objectif central sera la disponibilité commerciale de technologies fiables et compétitives dans des environnements diversifiés, le plus tôt possible dans la période 2015-2020. Pour cela il est nécessaire de mener des investigations visant à améliorer des technologies existantes mais aussi des travaux plus fondamentaux visant des « ruptures technologiques » (nouvelles technologies de combustion, nouveaux matériaux, nouvelles techniques de séparation des gaz, modélisation avancée du comportement du CO₂ en stockage géologique, nouvelles techniques de surveillance des stockages géologiques, ...). Pour la partie stockage géologique, l'objectif central sera d'établir les critères de sécurité, notamment pour le stockage en aquifère, basé sur les travaux scientifiques et techniques de modélisation prédictive du comportement du CO₂ dans les réservoirs, comme cela est recommandé par les experts du GIEC.

Objectifs de la R&D	Travaux	Horizon
Captage du CO₂ Mettre au point des procédés, intégrés à leur environnement industriel, permettant un rendement énergétique favorable et une réelle maîtrise des émissions de CO ₂ , tout en recherchant une réduction des coûts d'un facteur 2 à 3 (de 50-70€/tonne de CO ₂ évitée à environ 20-30€/tonne de CO ₂ évitée).	« post combustion », i.e. captage du gaz carbonique dans les rejets gazeux issus de la combustion :	MT
	« pré combustion » ou « IGCC », i.e. captage du CO ₂ lors de la fabrication d'hydrogène à partir de la matière première fossile et d'oxygène :	MT
	« oxycombustion », i.e. remplacer, à l'entrée du processus de combustion, le flux entrant d'air par un flux d'oxygène pour enrichir CO ₂ le gaz rejeté à l'issue de la combustion :	MT

Transport du CO₂	Transport par bateau Transport par pipeline	MT CT
Démontrer la faisabilité du stockage du CO₂ dans des environnements géologiques diversifiés	Adapter des technologies existantes dans le domaine pétrolier : caractérisation des sites injection bouchage des puits et étanchéité des puits surveillance, monitoring modélisation interactions roches / fluides évaluation de sûreté	CT CT CT MT MT MT MT

Tableau 23- priorités de recherche capture et séquestration du CO₂

5.4 Energie nucléaire

5.4.1 Eléments de contexte

Pour les besoins industriels, l'énergie nucléaire peut être produite à partir de deux types de réactions. La première, la fission, consiste à casser certains noyaux lourds (ex. uranium) en noyaux plus légers. La seconde, la fusion, consiste à fusionner deux noyaux légers (ex. deutérium et tritium, deux isotopes de l'hydrogène) en un noyau plus lourd (ex. hélium).

En 1942, la pile de Fermi a démontré la faisabilité de réactions de fission pouvant s'entretenir dans un réacteur nucléaire. Depuis, de nombreuses évolutions ont conduit à la situation actuelle d'un parc mondial où les réacteurs modérés à l'eau (les réacteurs à eau pressurisée ou REP et les réacteurs à eau bouillante ou REB, dits de deuxième génération) tiennent une place prépondérante en produisant 17% de l'électricité mondiale, 35% de l'électricité européenne et près de 80% de l'électricité française. Les réacteurs de 3^{ème} génération, comme l'EPR, représentent par ailleurs une technologie parvenue à maturité qui apporte des améliorations sensibles en terme de sûreté et de rendement énergétique. Ils pourraient être mis en service progressivement à partir de la prochaine décennie.

Leur point faible reste toutefois de ne pas utiliser de manière optimale la ressource « uranium » : seul 0.5% à 1% de l'uranium naturel utilisé pour fabriquer le combustible sert réellement à produire de l'énergie par fission (du fait de leurs caractéristiques, ils font appel à des combustibles enrichis en uranium 235, isotope naturellement peu abondant). Une telle performance ne permettra pas à l'énergie nucléaire de fission de constituer une solution pérenne dans le cas où une tension importante interviendrait au 21^{ème} siècle sur les ressources en uranium naturel. En outre, ces réacteurs ne permettent pas de mettre en œuvre des technologies en rupture pour la gestion des déchets radioactifs, en particulier celles issues des études de séparation poussée / transmutation menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et dont la récente loi du 28 juin 2006 demande explicitement qu'elles soient explorées plus en détail.

Les critères de développement durable et de minimisation des déchets, mis en avant pour les réacteurs de quatrième génération, obligent à concevoir des réacteurs tout à fait différents des réacteurs de 3^{ème} génération permettant l'iso-génération, voire la surgénération de la matière fissile (c'est à dire une production de matière fissile égale ou supérieure à celle consommée par le réacteur) ainsi que, le cas échéant, la transmutation de certains radioéléments aujourd'hui conditionnés dans les déchets ultimes. Les experts estiment aujourd'hui que des réacteurs de quatrième génération pourraient être prêts pour une industrialisation vers 2040. Sur la base des réserves estimées en uranium de la planète, ces systèmes seraient susceptibles de répondre au moins en partie, aux besoins énergétiques mondiaux sur

plusieurs millénaires.

Les débuts de la fusion thermonucléaire datent de la fin des années 50 avec la déclassification en 1957 des travaux menés sur le sujet aux USA. La fusion thermonucléaire d'isotopes de l'hydrogène (deutérium + tritium) nécessite des milieux extrêmement chauds (de l'ordre de 100 millions de degrés) pour permettre de vaincre la répulsion coulombienne des noyaux. Faisant suite aux travaux menés dans les installations de Cadarache (Tore Supra) et Culham (JET), 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 reste long et passera après ITER, par un démonstrateur électrogène 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 suggèrent que cette énergie ne pourrait être envisagée à une échelle industrielle que pour la fin du siècle. L'énergie apportée par la fusion thermonucléaire, si elle est un jour domestiquée, permettrait de répondre aux besoins énergétiques mondiaux pour de nombreux millénaires.

Les différences dans l'état d'avancement des recherches (à maturité pour la génération III, nécessitant la levée de verrous technologiques pour la génération IV et des développements fondamentaux tant théoriques que technologiques pour la fusion) et leurs potentialités croissantes en termes d'utilisation optimisée des ressources naturelles et de limitation des impacts sur l'environnement expliquent leur complémentarité.

Comme cela a déjà été présenté dans d'autres chapitres de ce rapport, un cadre global a été fixé par la loi de programme n° 2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique. Elle donne des objectifs ambitieux pour assurer la diversification de notre bouquet énergétique et maîtriser la croissance de la demande ; elle rappelle en outre la nécessité de préparer au mieux l'échéance de 2020, date à laquelle devrait être débattue la question du renouvellement du parc nucléaire français (en supposant une durée de vie moyenne de 40 ans pour les installations actuellement en service). Dans cette perspective, la loi précise que l'option nucléaire doit être maintenue ouverte au moins jusqu'à l'horizon 2020, notamment en s'assurant de la disponibilité à cette échéance de technologies modernes (réacteurs de troisième génération prêts à être industrialisés dans le cas où une telle décision serait prise, prototypes de quatrième génération pour préparer le moyen terme ...).

En cohérence avec ce cadre législatif global, des études sont aujourd'hui effectuées par les différents acteurs concernés (notamment le CEA, EDF et AREVA) pour optimiser les technologies de deuxième et troisième génération. Par ailleurs, des recherches plus prospectives sont menées, en particulier par le CEA, sur les systèmes de quatrième génération. De façon à définir des orientations dans ce second domaine, une réunion du Comité de l'énergie atomique (comité interministériel placé sous l'autorité du Premier ministre) a été consacrée le 17 mars 2005, à la stratégie nationale de recherche sur les réacteurs de 4^{ème} génération, et a fixé des axes de travail pour affiner progressivement les choix de notre politique nationale sur ces sujets. Le comité de l'énergie atomique du 20 décembre 2006 a arrêté un plan détaillé de recherches à mener au cours des prochaines années. Celles-ci privilégieront les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ou au gaz.

Dans le cadre de ce présent chapitre, les études menées respectivement sur les systèmes de troisième et de quatrième génération, sont présentées ainsi que les travaux sur la fusion thermonucléaire.

Enfin, les travaux relatifs à la gestion des déchets radioactifs sont évoqués dans ce rapport mais de façon ciblée, essentiellement au travers des technologies de séparation poussée / transmutation. Il ne s'agit donc que d'une vision partielle des objectifs fixés par la loi de programme du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs et qui concernent également l'entreposage ainsi que le stockage réversible en couches géologiques profondes. Une vision exhaustive des actions menées sur ces sujets sera développée dans les rapports du Comité d'Orientation et de Suivi des Recherches sur l'Aval du Cycle (COSRAC) et dans le plan national de gestion prévu par la loi et dont une première version est attendue pour la fin 2006. Concernant la séparation poussée / transmutation, interface entre le présent document et le futur plan national, les objectifs définis par la loi de 2006 sont les suivants : « Les études et recherches sur la séparation et la

transmutation des déchets radioactifs à vie longue sont conduites en relation avec celles menées sur les nouvelles générations de réacteurs nucléaires mentionnés à l'article 5 de la loi de programme n°2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique ainsi que sur les réacteurs pilotés par accélérateur dédiés à la transmutation des déchets, afin de disposer, en 2012, d'une évaluation des perspectives industrielles de ces filières, et de mettre en exploitation un prototype d'installation avant le 31 décembre 2020. ».

5.4.2 *Fission : La recherche pour les installations nucléaires françaises actuelles*

5.4.2.1 Amont du cycle nucléaire

L'amont du cycle nucléaire (c'est à dire les opérations de prospection pour l'uranium naturel, d'enrichissement et de fabrication des combustibles) est en pleine évolution. Les besoins d'uranium pourraient en effet s'accroître de façon significative (notamment en raison du développement de pays comme la Chine et l'Inde dans le domaine du nucléaire). Par ailleurs, le relais éventuel promis par le recyclage des matières fissiles dans des réacteurs rapides de quatrième génération, n'est pas aujourd'hui attendu par les experts avant plusieurs dizaines d'années. D'ores et déjà, le prix de l'uranium a été multiplié par quatre depuis 2001 et les tensions sur cette ressource ne semblent pas devoir se relâcher à court terme.

5.4.2.1.1 *Disponibilités de matière et production de concentrés uranifères*

Face à cette évolution, les opérateurs (notamment AREVA) souhaitent sécuriser leur accès aux réserves d'uranium naturel par des moyens accrus d'exploration ainsi que par l'amélioration des techniques minières (en particulier, mesures géophysiques et logiciels d'exploitation). Cette relance de la prospection minière se traduit par une demande accrue de personnel qualifié.

La plus grande partie de l'uranium naturel est aujourd'hui obtenue à partir d'un procédé de purification par solvants bien connu et maîtrisé. Le besoin de ressources nouvelles amène toutefois à considérer des minerais de plus faibles teneurs et à trouver des technologies adaptées à leur traitement, telles que la lixiviation in situ. Leur développement nécessite une installation de type pilote sur place. D'autres ressources méritent par ailleurs d'être reconsidérées, comme l'uranium des phosphates. Les minerais dans lesquels l'uranium est associé à d'autres métaux en produit principal ou sous produit (exemples récents : Olympic Dam ou Mac Arthur River) nécessitent en outre des développements spécifiques et plus ou moins complexes à adapter en fonction des gisements. Ces besoins de recherche (hors pilote sur place) sont assurés par le laboratoire de recherche et développement de Bessines d'AREVA NC, dont les moyens d'intervention pourront être élargis en matière de traitement de minerai (flottation, extraction par solvant, résines échangeuses d'ion).

5.4.2.1.2 *Conversion*

La conversion se pratique à Comurhex sur le site du Tricastin dans le sud de la France depuis de nombreuses années selon un procédé venu du CEA. Ce dernier est bien maîtrisé. Toutefois, eu égard, d'une part, à l'évolution des normes environnementales et, d'autre part, au vieillissement de l'outil industriel de nouvelles installations sont donc nécessaires. AREVA NC souhaite disposer des meilleurs procédés et estime que cela nécessiterait des recherches visant à simplifier le procédé et à en réduire son coût de manière significative. Des coopérations pourront se nouer entre le CNRS, AREVA NC et le CEA dans ce domaine.

5.4.2.1.3 *Enrichissement*

L'objectif central d'AREVA NC est aujourd'hui de préparer le remplacement des installations d'EURODIF utilisant le procédé de diffusion gazeuse. De façon à acquérir les nouvelles technologies dites d'ultracentrifugation gazeuse, AREVA NC a établi une *joint-venture* avec le groupe URENCO, détenteur de ce procédé. Les travaux de développement seront menés dans ce cadre, notamment dans

la perspective de renforcer encore la compétitivité et la fiabilité de la technologie. Enfin, les études relatives au procédé SILVA (enrichissement par laser), aujourd'hui arrêtées après avoir été menées de façon active dans les années 90, ne semblent pas devoir être reprises à court terme.

5.4.2.2 Réacteurs

Dans le domaine des réacteurs de puissance du parc EDF, les besoins de recherche sont définis en adéquation avec les enjeux de sûreté, de radioprotection, d'environnement et de compétitivité auxquels sont confrontées ces installations. A cet égard, EDF, en tant que propriétaire exploitant, privilégie les actions visant à augmenter l'énergie contenue dans, et fournie par le combustible (augmentation du taux de combustion menée parallèlement à l'augmentation de l'enrichissement), à assurer une maintenance efficace des installations (en particulier développement de systèmes de contrôle non destructifs), à répondre aux enjeux de sûreté et de radioprotection (développement de codes de neutronique, innovations pour améliorer encore la tenue aux séismes, instrumentation ...) et à enfin traiter les questions relatives à la durée de vie (compréhension des phénomènes de vieillissement, étude des modalités qui permettraient un allongement de la durée de vie des réacteurs au-delà de 40 ans ...).

5.4.2.3 Aval du cycle

La France dispose aujourd'hui d'un complexe industriel de premier plan international en matière de traitement des combustibles irradiés, situé à la Hague dans l'Ouest de la France et exploité par AREVA NC. Les ateliers en production ont été mis en service au début des années 90 et ont une capacité totale de 1 700 tonnes / an.

Les programmes de recherche et développement menés par AREVA NC dans ce domaine visent à :

- garantir les performances des procédés compte tenu de l'évolution des combustibles (augmentation du taux de combustion et prise en charge de nouveaux types de combustible, comme les MOX ou les combustibles usés issus de réacteurs de recherche) ;
- accompagner AREVA NC dans sa démarche « ALARA » visant à limiter autant que raisonnablement possible les rejets liquides et gazeux ;
- permettre une gestion optimisée des colis de déchets en regard des critères de sûreté et d'économie dans les différentes phases qui jalonnent leur devenir ;
- adapter les procédés existants pour un conditionnement performant et compétitif des déchets anciens.

5.4.3 Fission : Les recherches spécifiques pour la 3^{ème} génération et l'export

Les réacteurs de troisième génération destinés au parc français ou à l'export, s'inscrivent en relative continuité avec les réacteurs à eau pressurisée actuels, de sorte qu'ils bénéficient d'une grande part de la R&D réalisée pour le parc en exploitation. De ce fait, la part de la R&D réalisée ou / et comptabilisée spécifiquement pour cette troisième génération est assez réduite.

5.4.3.1 Les évolutions à moyen terme des concepts de troisième génération

Le développement du réacteur franco-allemand, l'EPR, a commencé au début des années 1990 et ce modèle de réacteur « évolutionnaire » a fait l'objet fin 2003 d'une commande de l'électricien finlandais TVO. EDF a par ailleurs décidé (délibération du conseil d'administration du 4 mai 2006) d'engager la réalisation à Flamanville d'une tranche EPR. La mise en service en 2012 permettra de préparer le renouvellement de son parc à l'horizon 2015-2020, dans le cas où ce dernier serait autorisé par les pouvoirs publics français. Au-delà, d'autres réacteurs de ce type, c'est à dire de troisième génération, sont susceptibles d'être construits à partir de la prochaine décennie ; leur conception permet une durée d'exploitation de 60 ans. Ils seront donc présents de façon significative au cours du 21^{ème} siècle et des améliorations interviendront naturellement par rapport aux réacteurs d'aujourd'hui

en fonction du retour d'expérience accumulé. Cela suppose que soient maintenues les capacités d'innovations et de développement des technologies, en particulier sur les matériaux, la physique du cœur et la conception des systèmes.

5.4.3.2 Les réacteurs à eau légère

Les améliorations visées correspondent aux objectifs suivants :

- poursuivre l'étude des phénomènes de dégradation et de vieillissement des matériaux et des composants des réacteurs, afin de justifier des durées de vie accrues ;
- réduire le coût d'investissement de ces réacteurs, en proposant une puissance unitaire adaptée au marché visé ainsi que la simplification ou l'optimisation des systèmes et circuits ;
- réduire leur coût d'exploitation, notamment en se concentrant sur le poste radioprotection. Cela nécessitera le développement de procédés permettant de réduire la contamination dans les réacteurs et d'optimiser les interventions par le développement d'une meilleure prédiction des débits de dose (développement des outils de calculs prédictifs appropriés).

Par ailleurs, il sera étudié la possibilité de coupler la production d'électricité pour le réseau à d'autres usages. Ceci concernera par exemple la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, selon des technologies existantes ou à développer, ou la production d'eau douce par osmose inverse.

5.4.3.3 Le combustible

Les études viseront à améliorer l'économie globale du combustible UO₂ et MOX (notamment via l'augmentation des taux de combustion avec recherche d'un optimum), à accroître sa robustesse en fonctionnement normal (résistance aux phénomènes d'usure ou de vibration) et aussi dans les situations de fonctionnement incidentelles et accidentelles.

Par ailleurs, la recherche vise aussi à accroître la flexibilité de fonctionnement (suivi de charge réseau) des réacteurs en minimisant l'interaction pastille-gaine.

5.4.3.4 L'aval du cycle

Certains pays développent aujourd'hui activement leur parc nucléaire et pourraient souhaiter disposer à terme de la technologie de traitement-recyclage. Pour permettre à la France d'être présente sur de tels marchés le moment venu, des études sont menées, dans le cadre d'une coopération CEA-AREVA, pour adapter le procédé PUREX aujourd'hui exploité à la Hague et concevoir un nouveau procédé de troisième génération. Il permettrait en particulier de ne pas conduire à l'extraction de plutonium séparé seul, pour répondre à de nouveaux standards en matière de non-prolifération. Le procédé en question (COEX) vise ainsi à maintenir le plutonium en mélange avec l'uranium et à améliorer la compétitivité économique du traitement/recyclage. Sa faisabilité scientifique est acquise, mais il reste encore des développements technologiques et industriels à réaliser. Il pourrait conduire à une application industrielle à l'horizon 2020 environ.

Dans ce cadre, trois grands axes de R&D sont nécessaires :

- le développement du procédé COEX (co-extraction, co-conversion en oxyde et céramisation de l'oxyde mixte uranium + plutonium) ;
- le traitement des effluents liquides et gazeux en fonction des contraintes d'implantation ;
- les développements technologiques, d'équipements (tête d'usine, précipitateur continu de forte capacité, ...).

5.4.4 Fission : Les outils expérimentaux nécessaires aux recherches

Les recherches et études réalisées pour le développement des technologies nucléaires nécessitent de disposer de capacités d'irradiation polyvalentes, de laboratoires permettant de manipuler des matières nucléaires, en particulier des matières irradiées en quantité significative, et des installations plus

classiques mais pouvant être de grande taille comme des boucles d'essais.

5.4.4.1 Principes, parc d'installations existantes et en projet

L'exploitation, la rénovation et le renouvellement des outils expérimentaux s'inscrivent dans un cadre déterminé par les principes suivants :

- l'optimisation globale de la simulation numérique et de l'approche expérimentale afin de définir les voies les plus efficaces possibles ;
- l'intégration d'une chaîne d'outils expérimentaux complémentaires. C'est en particulier le cas pour l'étude des matériaux et des combustibles, avec les étapes de fabrication, d'irradiation, puis d'examen et d'analyse, impliquant des « laboratoires chauds » en amont et en aval d'un réacteur d'irradiation technologique ;
- la rationalisation et la concentration des installations dans une vision européenne de l'activité des centres de recherche ;

Ces différents principes ont conduit à un certain nombre de choix :

- *dans le domaine des réacteurs*, le renouvellement du réacteur d'irradiation technologique OSIRIS a été décidé via le réacteur RJH (cf. paragraphe spécifique) ;
- *pour les laboratoires chauds nécessaires à l'étude des combustibles et les matériaux*, la stratégie retenue a été celle d'une rénovation des installations existantes (LEFCA et LECA-STAR, Cadarache et LECI, Saclay) ;
- *pour le traitement des combustibles usés*, l'installation ATALANTE de Marcoule a été construite progressivement dans les années 90 et concentre aujourd'hui le potentiel expérimental du CEA. ATALANTE est aussi un élément clé du réseau européen ACTINET ; elle sera également associée au futur Institut de Chimie Séparative (Unité mixte de recherche du CEA, du CNRS et de l'Université de Montpellier) ;
- *dans le domaine de la sûreté*, les réacteurs expérimentaux SILENE (pour l'étude des accidents de criticité en solution), PHEBUS (analyse des conséquences d'un accident nucléaire, notamment en terme de relâchement des produits de fission) et CABRI (étude des conséquences liées aux sauts de réactivité des combustibles) permettent d'étudier le comportement accidentel des combustibles dans le cadre de programmes internationaux pilotés par l'IRSN. Des réflexions sont aujourd'hui en cours pour décider du devenir de ces installations ;
- *dans le domaine de la physique des réacteurs*, les mesures intégrales et la qualification des calculs de cœurs sont réalisées en utilisant les « maquettes critiques » EOLE-MINERVE et MASURCA de Cadarache en complément des mesures différentielles effectuées dans divers laboratoires européens ;
- *dans le domaine de l'étude des assemblages combustibles*, l'utilisation de la plate-forme technologique HERMES
- *dans le domaine des disciplines non exclusivement nucléaires*, un potentiel expérimental consacré en priorité aux applications nucléaires existe en thermohydraulique, en technologie et en mécanique (plate-forme d'études sismiques TAMARIS).

5.4.4.2 Le RJH

Dans la perspective de l'arrêt du réacteur d'irradiation OSIRIS au début de la prochaine décennie, le CEA souhaite construire, puis exploiter un nouveau réacteur expérimental (le réacteur Jules Horowitz ou RJH), dont la mise en service est aujourd'hui envisagée en 2014. Au-delà des seuls besoins français, l'ambition du CEA serait que ce réacteur dote l'Europe d'une infrastructure de recherche majeure pour l'étude du comportement sous irradiation des matériaux et combustibles. Cet élargissement à d'autres pays européens est un enjeu essentiel dans la mesure où à l'horizon 2010, les réacteurs de recherche européens auront en général atteint leurs 40 ans et seront soit arrêtés, soit sur le point de l'être. Des discussions sont ainsi en cours au niveau européen dans le cadre de l'élaboration

du 7^{ième} PCRD. Des accords ont été signés au niveau européen et international (Belgique, Finlande, Espagne, République Tchèque, Japon).

Les objectifs du RJH sont les suivants : participer aux études sur l'allongement de la durée de vie des réacteurs du parc actuel (2^{ème} génération), soutenir le déploiement des réacteurs de 3^{ème} génération et les évolutions de leurs combustibles, participer au développement de la 4^{ème} génération, notamment pour étudier le comportement sous-irradiation de matériaux de structure, sachant que l'accès à un irradiateur complémentaire offrant un flux suffisant de neutrons rapides (>0,1 MeV), tel que le prototype envisagé pour 2020 restera toujours indispensable sur ce dernier point.

5.4.5 Fission : Les systèmes nucléaires du futur

5.4.5.1 Contexte

Renvoyant à des technologies en rupture par rapport aux réacteurs à eau pressurisée de deuxième ou de troisième génération, ces systèmes nécessitent des études encore importantes, que ce soit pour la conception des réacteurs, mais aussi pour celles des installations du cycle du combustible qui permettront leur fonctionnement (d'où la notion de systèmes).

Ces technologies devraient en premier lieu répondre à des besoins électrogènes. Des réflexions sont également menées pour étudier les conditions d'une utilisation de l'énergie nucléaire au-delà de la seule production d'électricité, par exemple pour la production de chaleur industrielle, la production d'hydrogène, l'élaboration de carburants de synthèse ou encore la production d'eau douce. Il est toutefois difficile de discriminer parmi ces différentes utilisations non électrogènes possibles celles qui seront in fine mises en œuvre et celles qui nécessiteront des systèmes de 4^{ème} génération. Plusieurs facteurs expliquent ces incertitudes.

• La problématique des ressources et des matières valorisables

Concernant les applications électrogènes, la compétitivité des réacteurs à neutrons rapides (notamment par rapport aux réacteurs à eau légère de troisième génération) ne sera établie que dans un contexte de raréfaction des ressources en uranium naturel. Or cette question nécessite d'avoir une vision claire sur :

- les quantités d'uranium potentiellement récupérables à un coût de production donné ;
- le rythme de consommation lié au développement de l'énergie nucléaire à l'échelle mondiale ;
- la performance d'utilisation de l'uranium naturel par les réacteurs des générations actuelles ainsi que les capacités de recyclage des matières valorisables contenues dans les combustibles usés.

Sur ces différents paramètres (plus particulièrement les deux premiers), la visibilité est limitée et il s'agit là d'une des difficultés de l'exercice stratégique : comment optimiser le développement d'une filière sans pouvoir préjuger de sa date de déploiement industriel ?

• Les problématiques énergétiques et climatiques

Plus largement, la politique énergétique semble aujourd'hui s'orienter vers une mutation significative à l'échelle mondiale. Toutefois, certains paramètres économiques importants ne sont pas encore stabilisés, en particulier le coût de la tonne de CO₂ émise ainsi que le cours des produits pétroliers. Dans le cas où des politiques plus volontaristes seraient mises en œuvre pour réduire les émissions de CO₂ et où la période actuelle de prix élevés du pétrole perdurerait, il y aurait alors un véritable intérêt à diversifier les applications de l'énergie nucléaire, notamment pour produire de la chaleur, de l'hydrogène ou des carburants de synthèse.

La problématique de la production massive d'hydrogène et des pétroles non conventionnels par voie nucléaire est décrite ci-dessous.

Il est certain que la fabrication de combustibles liquides (carburants en particulier) à partir d'huiles fossiles très lourdes, de sables bitumineux, de biomasse ou de charbon ira en s'accroissant au cours des prochaines années.

A l'évidence l'énergie nucléaire susceptible de pouvoir fournir électricité, chaleur et hydrogène via des procédés d'électrolyse performants, est de nature à pouvoir être utilisée dans ces domaines :

- en substitution du reformage du gaz naturel pour la production massive d'hydrogène nécessaire aux procédés industriels et permettre corrélativement une baisse des émissions de CO₂ des raffineries ;
- pour permettre, par la fourniture de vapeur et d'hydrogène, l'exploitation aussi propre que possible des sables bitumineux (upgrading) ;
- pour permettre la fabrication de pétrole « bon marché » dans des pays où l'on dispose à la fois d'une biomasse aisément accessible, facile à récolter et ne nécessitant pas de remembrement agricole.

Les mêmes technologies pourraient être mises en œuvre à partir du charbon pour produire des pétroles synthétiques. Divers procédés de synthèse sont revisités par des organismes de recherche, en particulier aux Etats-Unis, et par des sociétés industrielles, notamment en Afrique du sud où 30% du combustible consommé dans les transports en provient.

AREVA s'est fixé comme objectif de rechercher d'ici 2015, la meilleure technologie d'électrolyse susceptible d'être combinée à une source d'énergie d'origine nucléaire et de disposer si possible d'un prototype industrialisable dès 2015. Le développement d'une électrolyse performante, c'est à dire pas beaucoup plus chère que les solutions « fossiles » (par ex. le reformage du méthane) et pouvant être mise en œuvre à une grande échelle est un enjeu technique fort. Le cas échéant, AREVA recherchera à explorer avec les pays ou les acteurs qui en seraient des promoteurs actifs, des systèmes énergétiques à émission minimale de CO₂.

• La problématique des déchets

Il est important de souligner que les systèmes de quatrième génération sont, au-delà des perspectives concernant la transmutation des actinides mineurs, les seuls à pouvoir recycler de manière efficace et pérenne le plutonium et l'uranium 238. Dans le cas où ces systèmes ne verraient pas le jour, une stratégie de gestion devrait donc être mise en œuvre pour les combustibles MOX usés produits par les réacteurs actuels qui deviendraient de facto des déchets de haute activité à vie longue et devraient être gérés comme tels.

En conclusion, ces enjeux sont fondamentaux pour le développement d'une stratégie de recherche pertinente. En particulier, suivant les usages envisagés et les pays cibles visés, ce sont des technologies différentes de réacteurs qu'il faudra développer (réacteurs à neutrons rapides ou réacteurs thermiques à haute ou très haute température) avec des gammes de puissance adaptée. On en conclut donc que dans la situation actuelle, l'objectif de la stratégie des programmes de recherche devra être de conserver la flexibilité nécessaire de façon à être « réorientable » aisément si nécessaire. On comprend également que de nombreux facteurs sont exogènes aux seuls acteurs français (que ce soient les industriels, les établissements de recherche ou encore les pouvoirs publics) et qu'il faut mettre en place des systèmes de veille pertinents pour repérer les inflexions structurantes et adapter les stratégies. Ces différents points seront développés de façon plus détaillée dans la partie stratégie.

5.4.5.2 Les forums de R&D

5.4.5.2.1 Génération IV

Plusieurs forums de discussion ont été créés au cours de ces dernières années sur la thématique des systèmes nucléaires du futur. Parmi ceux-ci, le cadre le plus dynamique s'est révélé être le Forum International Generation IV lancé en 2000 par le ministère américain de l'énergie (DOE). Dix pays (Etats-Unis, France, Japon, Argentine, Brésil, Canada, Afrique du Sud, Corée du Sud, Suisse et Royaume-Uni) et l'Union européenne y participent. L'entrée formelle de la Chine et de la Russie interviendra en 2007. La France y apporte depuis le début une contribution très active et a ratifié, en février 2005, l'accord cadre Génération IV.

A l'issue de la première phase de ses travaux (2000-2002), le Forum Génération IV a publié un rapport d'orientation sur les technologies jugées indispensables ou les plus prometteuses pour les prochaines

décennies. Ce rapport a souligné le caractère essentiel du recyclage du combustible dans les réacteurs à neutrons rapides de 4^{ème} génération pour réutiliser les matières fertiles (uranium) et fissiles (plutonium) pour la production d'énergie, ainsi que les avantages d'un recyclage associant également les actinides mineurs (neptunium, américium, curium) pour les brûler et les soustraire ainsi aux déchets ultimes. Par ailleurs, six systèmes nucléaires ont été sélectionnés comme porteurs d'avancées notables en matière de compétitivité économique, de sûreté, de réduction des déchets radioactifs à vie longue, d'économie des ressources en uranium, ainsi que de résistance à la prolifération et à la malveillance.

dénomination <i>Generation IV</i>		équivalent français	
Sodium-cooled fast reactor	SFR	Réacteur rapide refroidi au sodium	RNR-Na
Gas-cooled fast reactor	GFR	Réacteur rapide refroidi au gaz	RNR-G
Very high temperature reactor	VHTR	Réacteur à très haute température	RTHT
Supercritical water-cooled reactor	SCWR	Réacteur refroidi à l'eau supercritique	RESC
Lead-cooled fast reactor	LFR	Réacteur rapide refroidi au plomb	RNR-Pb
Molten salt reactor	MSR	Réacteur à sels fondus	RSF

Tableau 24 - Les six systèmes sélectionnés dans le Forum Generation IV

La France s'implique préférentiellement sur les trois systèmes SFR, GFR et VHTR. D'une façon générale, les partenaires majeurs du Forum Génération IV s'investissent en priorité dans les systèmes SFR et VHTR. L'implication dans les filières GFR et LFR est variable et plus modeste et procède essentiellement du souci de maintenir un effort de R&D sur une seconde technologie de réacteur à neutrons rapides. Jusqu'en 2005, les USA ont privilégié le VHTR, mais depuis début 2006, la priorité est donnée au SFR, même si le VHTR continue à être soutenu. Le Japon se concentre sur la filière SFR avec le redémarrage du réacteur expérimental MONJU ; il poursuit l'exploitation d'un réacteur expérimental HTR (le HTTR) avec des développements sur la filière VHTR à un niveau moindre. Enfin, un budget limité est maintenu sur le GFR. La Russie a annoncé que son effort prioritaire porterait sur le SFR, et pense travailler également sur le LFR et le VHTR. La Chine a un programme de R&D ambitieux à la fois sur le SFR et le (V)HTR.

5.4.5.2.2 Communauté européenne

L'absence de vision commune sur l'énergie nucléaire au sein des Etats membres, ne permet pas aujourd'hui à l'Union Européenne d'avoir une politique de recherche ambitieuse, même si les « Livres verts » de novembre 2000 et mars 2006 ou l'entrée formelle de l'Euratom dans le Forum Generation IV le 11 mai 2006 sont des signes encourageants. Le montant total alloué à ces projets reste modeste ; il est de 12,1 M€ pour le 5^{ème} PCRD et d'environ 15 M€ pour le 6^{ème}. Le programme européen sur les systèmes nucléaires du futur pourrait cependant croître dès le 7^e PCRD en bénéficiant de synergies avec la recherche actuelle sur la séparation et la transmutation.

5.4.5.2.3 GNEP

Le programme GNEP (Global Nuclear Energy Partnership), initiative présidentielle, a été lancé fin janvier 2006 dans la perspective d'un développement important de l'énergie nucléaire dans le monde, avec pour objectif une maîtrise des aspects liés à la prolifération. L'idée de base est que l'enrichissement de l'uranium, le traitement et le recyclage des combustibles usés soient effectués dans des usines situées au sein d'un nombre limité de pays (consortium d'états « Fuel cycle States ») disposant des technologies leur permettant le recyclage des transuraniens dans des réacteurs rapides. En contrepartie de ces services fournis à des prix compétitifs, les pays non-membres du consortium (« Reactor States ») s'engageraient à ne pas développer les technologies du cycle.

Cette initiative marque donc un changement fondamental de la position des Etats-Unis en soulignant les avantages du traitement / recyclage du combustible. Il convient par ailleurs de remarquer que le devenir des déchets radioactifs issus du traitement des combustibles étrangers dans les centres internationaux, n'est pas abordé ; or, cette question est fondamentale pour les opinions publiques.

Le DOE prévoit actuellement une approche en deux phases pour les démonstrations technologiques.

La première consiste à déployer des installations de taille commerciale lorsque les technologies existent déjà ou sont sur le point d'aboutir. La seconde, qui demande plus de R&D (et qui peut démarrer en parallèle de la première), concerne les combustibles contenant à la fois du plutonium et des actinides mineurs pour en assurer la transmutation. Il est actuellement prévu la réalisation de trois installations :

- CFTC (Consolidated Fuel Treatment Center) destinée au traitement des combustibles des réacteurs à eau légère pour fabriquer le combustible de réacteurs rapides, puis à terme les assemblages contenant les isotopes à transmuter ;
- ABR (Advanced Burner Reactor), réacteur électrogène (200-800 MWe), rapide au sodium avec un combustible oxyde ou métal, destiné à démontrer la faisabilité de la transmutation. Les caractéristiques souhaitées pour ce réacteur sont la sûreté (il doit pouvoir être licencié par la NRC), l'économie (il doit être compétitif avec les réacteurs à eau de 3^{ème} génération), et être commercialement déployable en 2020. Dans un premier temps le combustible serait du MOX, mais l'ABR doit permettre de tester des cibles d'actinides mineurs et à terme d'utiliser un combustible fabriqué avec des actinides mineurs ;
- AFCF (Advanced Fuel Cycle Facility) destinée à soutenir les efforts de R&D des laboratoires américains sur les technologies à mettre en œuvre pour assurer le traitement et la fabrication de combustible avec les isotopes à transmuter.

Pour le moment, seules les deux premières installations ont fait l'objet d'une « Expression of Interest ».

5.4.5.3 Les six systèmes Generation IV

Cette partie vise à décrire de façon synthétique les concepts qui ont été sélectionnés dans le cadre du Forum Génération IV par les différents partenaires internationaux.

Les systèmes peuvent être classés en trois groupes distincts :

- le premier groupe, le plus mûr, comprend le réacteur rapide au sodium (SFR) dont on peut estimer l'avance à environ 10 ans (pour les démonstrations de sûreté et de fiabilité) sur les filières du groupe suivant ;
- le second groupe concerne les systèmes pour lesquels, il existe déjà une expérience partielle. On y trouve le réacteur thermique à gaz à très haute température (VHTR) et les réacteurs rapides à caloporteur gaz (GFR) ou plomb (LFR). Le GFR et le VHTR peuvent en effet se prévaloir de l'expérience HTR pour le système de conversion de chaleur, les circuits hélium et les matériaux haute température. Il est à noter que le positionnement du VHTR entre le 1^{er} et le 2^{ème} groupe dépend des exigences en température et donc du temps de développement nécessaire pour avoir des matériaux adaptés à ces exigences. Dans le cas du LFR l'expérience des réacteurs de propulsion navale russe peut être utilisée, même si l'extrapolation à un réacteur de puissance électrogène n'a rien d'évident ;
- enfin le dernier groupe comprend les concepts en rupture complète qui relèvent davantage de la 5^{ème} génération et dont un déploiement industriel n'apparaît plausible que dans la seconde moitié de ce siècle ou au-delà ; dans cette catégorie, se trouvent le réacteur à eau supercritique (SCWR) et le réacteur à sels fondus (MSR).

5.4.5.3.1 Réacteur rapide refroidi au sodium (RNR-Na ou SFR)

Le SFR est un système à neutrons rapides, refroidi au sodium liquide à cycle du combustible fermé. Plusieurs réacteurs à neutrons rapides mettant en œuvre un caloporteur sodium ont été exploités depuis les années 70 en particulier en France (35 ans de fonctionnement pour Phénix dans la perspective de son arrêt prévu pour 2009), au Japon, en Russie ou en Inde. Toutefois, malgré ces connaissances, les experts estiment aujourd'hui que la mise en service industrielle d'un SFR présentant une évolution significative par rapport aux concepts du début des années 90, est difficilement envisageable avant 2035/2040. Différents enjeux technologiques ont en effet été identifiés, en particulier :

- *ceux liés à la sûreté du réacteur*, notamment le coefficient de vidange positif (possibilité d'emballement de la réaction en cas de perte du caloporteur), les interactions entre le sodium et l'air ou l'eau, ainsi que les évolutions possibles du référentiel de sûreté (par exemple, proposer un système permettant de récupérer les éléments du cœur dans le cas de sa fusion) ;
- *ceux liés à sa compétitivité*, notamment pour réduire ses coûts d'exploitation, d'investissement et de démantèlement : simplification de la conception d'ensemble (suppression éventuelle du circuit intermédiaire sodium/sodium, mise en œuvre de solutions alternatives au cycle eau-vapeur pour la conversion d'énergie) et a minima réduction du coût des générateurs de vapeur ; utilisation de matériaux de structure plus performants, notamment pour accroître la température de sortie du réacteur et permettre une amélioration du rendement thermique ou pour réduire la taille des circuits ;
- *ceux liés à l'exploitation* (favoriser les inspections en service ainsi que les opérations de maintenance, améliorer la disponibilité du réacteur, ce qui implique notamment d'avoir une manutention permettant de réduire le temps des arrêts pour rechargement) ;
- *ceux liés à la non prolifération*, l'enjeu étant de parvenir à un concept isogénérateur (c'est à dire produisant autant de plutonium que le réacteur en consomme) robustes en terme de prolifération, ce qui doit conduire à étudier et évaluer différentes alternatives pour produire le plutonium, et en particulier des solutions sans couverture radiale ou avec couvertures radiales chargées en actinides mineurs. Par ailleurs la France devra prendre une part active à la définition des standards de non-prolifération ;
- *ceux liés à l'aval du cycle*, notamment dans le cadre de la mise en œuvre d'un recyclage des actinides mineurs. Des expériences passées (Superfact) en ont montré la faisabilité scientifique, mais une validation de l'ensemble des étapes (technologie du cycle, fabrication et irradiation) reste à démontrer au moins au niveau de l'assemblage et peut-être du cœur.

Les principales étapes du développement sont décrites dans le cas où le déploiement de tels réacteurs serait effectué en 2040. Dans le cas contraire, l'opportunité de disposer d'un prototype dans la décennie 2020-2030 devrait naturellement être reconsidérée. Il convient d'insister sur le fait que, à part celle de 2012, les échéances sont données à titre indicatif et qu'elles ne sauraient revêtir à ce stade un caractère d'objectif calendaire précis.

2012	Choix des options de conception du SFR (architecture, système de conversion ...)
2015-2018	Fin de l'avant-projet détaillé (APD) et début de la construction d'un prototype (250 à 600MWe)
2020-2023	Mise en service du prototype
2035	Mise en service d'une éventuelle tête de série
2040	Déploiement industriel possible

Tableau 25– Etapes du développement du SFR envisagées

La première étape aujourd'hui engagée doit se poursuivre jusqu'en 2012. Après une consolidation en 2009 des orientations données, à la R&D, il s'agira en 2012, s'il est décidé de poursuivre les travaux sur cette filière, de faire les choix technologiques en fixant les options d'un réacteur de puissance SFR susceptible de faire partie d'un parc électrogène, en particulier le parc français. Lors de cette étape, il faudra également définir les objectifs du prototype (son cahier des charges de façon à ce qu'il permette d'extrapoler avec le moins de risques possibles les performances économiques et techniques du réacteur et de tester des variantes). Ces travaux débiteront par des études et une analyse des moyens expérimentaux disponibles dans le monde ; des expérimentations nécessitant entre autres plusieurs boucles sodium auront également lieu, mais pas avant 2009 compte tenu des délais nécessaires à leur construction. Les boucles technologiques pour la qualification de composants ne seront nécessaires qu'après la décision à prendre en 2012, de poursuivre les travaux sur la filière SFR.

Par ailleurs, devront être définis le plus tôt possible et en tout cas avant 2012 :

- les modalités de gestion de la propriété intellectuelle, en particulier entre les différents partenaires français (le CEA, EDF et AREVA) mais aussi dans le cadre international, avec les partenaires du

Forum Génération IV ou dans des coopérations bilatérales. Ce point est le plus urgent et devra être traité bien avant 2012 ;

- l'organisation du consortium qui sera chargé de mener à bien la réalisation et l'exploitation du prototype ;
- le tour de table financier pour les étapes suivantes.

Il est important de noter que pendant cette phase 2007-2012, une attention extrême sera portée aux questions de sûreté et qu'un dialogue devra être conduit avec l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) pour définir le référentiel de sûreté applicable et donc pouvoir produire un dossier d'options de sûreté qui soit a priori recevable. Ce dossier (DOS) ne pourra cependant être émis qu'un an après cette première phase : il est nécessaire que les options de conception soient choisies avant de pouvoir établir le DOS.

Suivant les résultats obtenus dans le cadre de cette première phase et notamment la possibilité de développer des concepts avancés par rapport à ceux du début des années 90 (maintenance, inspections en service, mécanismes visant à gérer un accident du cœur ...), une deuxième phase pourrait être conduite entre 2013 et 2018. Son objectif principal serait de préparer les dossiers nécessaires au lancement de la construction d'un prototype : production des études d'avant-projet sommaire et détaillé, instruction du rapport préliminaire de sûreté (RPrS) par le groupe permanent placé auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire.

La construction du prototype devrait ensuite nécessiter cinq ans environ. Prévoir un délai d'environ 10 ans entre la construction du prototype et de la tête de série semble raisonnable sachant que le début de la construction de Superphénix a débuté 4 ans après le démarrage de Phénix.

5.4.5.3.2 Réacteur rapide refroidi au gaz (RNR-G ou GFR)

Le GFR, comme le SFR, est un système à neutrons rapides à cycle du combustible fermé. Dans le cadre du Forum Génération IV, les pays membres ont décidé de travailler sur un concept à même de recycler non seulement le plutonium, mais aussi les actinides mineurs.

Ce réacteur a été conçu pour présenter une alternative attractive au SFR et constituer une voie innovante pour les réacteurs à neutrons rapides. En effet, même s'il est nettement moins bon caloporteur que le sodium, l'hélium présente une transparence optique à même de faciliter les opérations de maintenance et de réparation du système, et une transparence aux neutrons qui conduit à quasiment découpler le fonctionnement du cœur et l'état du caloporteur (monophasique et gazeux), ce qui se traduit par un effet de vidange du caloporteur très modeste en réactivité.. Le GFR permettrait de satisfaire à long terme des besoins autres qu'électrogènes (comme le HTR à moyen terme), sans être dépendant des tensions sur le coût de l'uranium. La compétitivité du réacteur, dans sa version électrogène, pourrait éventuellement bénéficier de l'utilisation d'un cycle direct si les problèmes technologiques liés à la turbine étaient résolus. En outre, les choix de conception ont été faits pour permettre de véritables innovations technologiques, notamment via le développement d'un combustible à plaques alvéolées qui permettrait de résister à des températures très élevées et ainsi de limiter fortement les relâchements de produits de fission en cas de rupture de la première barrière.

Le GFR, ne disposant pas de retour d'expérience, le développement de cette filière nécessite des tâches supplémentaires par rapport à celles listées dans le plan de développement du SFR. Les atouts ou inconvénients en terme de sûreté de ce concept restent par ailleurs à instruire. La date d'un éventuel déploiement industriel de cette filière est estimée au plus tôt en 2050.

D'ici à 2012, les premiers travaux devraient porter a minima sur une étude de pré faisabilité de la filière portant sur les deux principaux verrous technologiques que sont l'assemblage combustible et la sûreté du réacteur. Sur ce dernier point, il s'agit de traiter la question de l'évacuation de la puissance résiduelle, en cas de perte de l'hélium et d'analyser le comportement du cœur en cas d'accident grave.

Concernant l'assemblage combustible, un enjeu important est de concevoir un combustible réfractaire, résistant aux hautes températures, capable de supporter des flux élevés de neutrons rapides et présentant une forte densité en noyaux lourds pour assurer au moins l'isogénération. Par ailleurs, on disposera vers 2010-2011 des résultats des examens post-irradiatoires des expériences FUTURIX MI

et FUTURIX-Concept, qui seront chargées dans Phénix début et mi-2007. Elles permettront de valider les principes de conception de l'assemblage GFR, pour pouvoir passer à la phase suivante. Il est à noter qu'elles ne qualifieront toutefois pas le combustible GFR dont la conception aura fortement évolué par rapport à ce qu'elle était au moment de la fabrication des échantillons à irradier dans Phénix.

D'autres irradiations expérimentales sont à l'étude par exemple dans les réacteurs BR2 en Belgique, ATR aux Etats-Unis, et Joyo au Japon.

L'étape suivante, si elle est décidée en 2012 à l'issue des études de pré faisabilité, pourrait consister en la construction du Réacteur Expérimental de Développement Technologique, (REDT) d'environ 50 MWth, sans système de conversion et destiné à démontrer la faisabilité technique du concept. Il serait appelé à jouer pour le GFR, un rôle similaire à celui tenu par RAPSODIE pour le développement en France de la filière SFR. Ses objectifs seraient :

- de valider un premier référentiel de sûreté, étape vers celui du GFR ;
- de compléter la qualification globale de l'élément combustible ;
- de qualifier les concepts d'assemblages du cœur (combustible, absorbant...);
- de démontrer le bon fonctionnement et les performances du contrôle du cœur et de l'instrumentation associée.

A l'issue de ces travaux, les étapes déjà décrites pour le SFR devraient être menées, avec notamment la construction d'un prototype électrogène GFR de quelques centaines de MWe. Pour le moment, il n'est pas encore possible de donner des dates : la faisabilité du combustible étant le verrou technologique essentiel pour le GFR, il est évident que le passage aux étapes ultérieures est conditionné par la qualification d'un combustible de bonne qualité.

5.4.5.3.3 Réacteur thermique à caloporteur gaz et très haute température (VHTR)

Le VHTR est un système à caloporteur gaz à neutrons thermiques, proposé dans le cadre du Forum Generation IV avec un cycle du combustible ouvert. C'est le seul système qui ait été proposé uniquement avec un tel cycle. La motivation essentielle de sa sélection était sa capacité à atteindre les très hautes températures : au moins 950°C avec un objectif de 1000°C pour pouvoir produire massivement de l'hydrogène par décomposition thermochimique de l'eau (cycle iode/soufre) ou par électrolyse à haute température, de manière dédiée ou en co-génération d'hydrogène et d'électricité. Le VHTR est l'héritier des Réacteurs à Haute Température qui ont fait l'objet d'importantes réalisations dès la fin des années 60. Aujourd'hui l'existence de nombreux projets souligne l'intérêt porté à nouveau à ce type de réacteur dans le monde.

Les concepts étudiés sont de faible puissance (300 MWe au maximum) de façon à autoriser une évacuation passive de la puissance résiduelle dans le cas de la perte du caloporteur hélium, ce qui constitue un avantage unique pour cette filière.

Le positionnement stratégique de ce réacteur reste toutefois à préciser à ce jour: il n'est pas acquis que ses applications à moyen terme nécessitent des températures de 1000°C en sortie et justifient l'effort de R&D important pour y parvenir ; par ailleurs, la faible puissance unitaire du réacteur nuit à sa compétitivité pour des applications électrogènes. En ce qui concerne les aspects calogènes, les besoins ne sont pas encore bien identifiés, ce qui explique par exemple que les cahiers des charges des différentes initiatives en cours (NGNP sous l'égide du DOE et VHTR dans le cadre de Génération IV) sont différents notamment sur la température de sortie de l'hélium. Le premier est à haute température (850°C), le second à très haute température (1000°C).

Au-delà, les clés de la faisabilité du VHTR sont nombreuses : le développement de matériaux de structure résistant à de très hautes températures, la réalisation de composants (échangeurs) avec ces matériaux, le devenir du combustible utilisé (comportement en l'absence de traitement ou mise au point de procédés permettant d'extraire le noyau combustible de la particule), le devenir du graphite, le développement de procédés de production d'hydrogène et leur couplage au réacteur.

L'objectif d'une réalisation prototype vers 2020 (dans le cadre européen ou dans celui du Forum Génération IV) impose de lancer des études de définition en 2012, ce qui constitue un jalon déterminant pour l'aboutissement de la R&D, et donc les performances visées, notamment en température.

5.4.5.3.4 *Les autres systèmes*

Le concept LFR (Lead Fast reactor ou réacteur rapide à caloporteur plomb)

Il concerne une large gamme de réacteurs : des réacteurs « batterie » de 50 à 150 MWe, des réacteurs modulaires d'environ 300 à 400 MWe et des réacteurs de puissance de 1200 MWe à combustible métallique ou nitrure. La seule expérience aujourd'hui disponible est celle des Russes via le développement de certains sous-marins qui ont fonctionné avec du caloporteur plomb-bismuth, sans rechargement, à très faible puissance (155 MWth) et avec de nombreux problèmes techniques.

Le plomb permet comme le sodium de fonctionner à une pression faible et confère une importante inertie thermique ; il permet en outre d'aller plus haut en température, d'éviter le circuit intermédiaire grâce à son absence de réaction violente avec l'eau, et ne présente pas d'effet de vide positif. En revanche, de nombreux points restent à étudier, notamment le développement de nouveaux types de combustibles (nitrure), le contrôle de la chimie du caloporteur qui influence directement la corrosion des structures du circuit primaire, les conséquences liées à la forte densité du plomb (le combustible et les internes flottent naturellement dans le plomb). La difficulté d'inspecter les structures est accrue par le fait que compte tenu de la température de solidification du plomb, l'arrêt à froid se fait à 400°C ce qui pose de gros problèmes de faisabilité pour les capteurs. Ces difficultés expliquent sans doute pourquoi les Russes, promoteurs de ce projet, n'en font pas leur priorité dans le Forum Génération IV.

Le réacteur supercritique (SCWR)

L'eau supercritique possède des propriétés intéressantes, notamment du fait qu'elle ne représente plus qu'une seule phase fluide ce qui supprime de facto, tout phénomène de crise d'ébullition limitant aujourd'hui la puissance dans les réacteurs à eau pressurisée ou à eau bouillante. Ce système est envisagé en deux versions : un réacteur à neutrons thermiques associé à un cycle du combustible ouvert et un réacteur à neutrons rapides associé à un cycle fermé pour un recyclage de l'ensemble des actinides.

Etudié dès 1950, ce concept a fait l'objet de projets qui n'ont jamais abouti à une réalisation, probablement à cause de l'importance des recherches qu'il aurait été nécessaire d'engager sur les différents points durs. Ce système a été relancé au début des années 90 par l'université de Tokyo qui recherchait des améliorations sur le concept à eau bouillante. La stabilité du réacteur en fonctionnement normal et la capacité de gestion des accidents de dépressurisation (avec retour du caloporteur en double phase) reste à démontrer et constitue l'une des principales difficultés rencontrées, en particulier pour la version à spectre rapide. Les questions d'instabilités thermohydraulique et neutronique couplées sont un autre sujet de préoccupation. Les autres clés de la faisabilité du SCWR sont les matériaux de structure et de gainage du combustible devant résister à la corrosion par l'eau supercritique en présence d'hydrolyse. S'y ajoute l'endommagement des matériaux par les neutrons pour le concept rapide.

Le réacteur à sels fondus (MSR) et cycle thorium

Dans le Forum Génération IV, ces réacteurs ont été classés dans les concepts non-classiques du fait de leurs caractéristiques originales et particulièrement innovantes. En France, ces systèmes donnent lieu à des études menées par le CNRS, avec le soutien d'EDF et du CEA notamment dans le cadre du Groupement de Recherche GEDEPEON.

Le combustible de ce réacteur est un mélange de sels liquides dans lesquels les actinides sont dissous. Ce mélange sous-critique pénètre par le bas du cœur à 550°C et arrive dans des canaux entourés de graphite qui, par son effet modérateur, rend ce mélange liquide critique, ce qui l'échauffe à 700°C avant qu'il ne cède sa chaleur dans un échangeur. Les sels liquides sont traités en dérivation du réacteur puis réinjectés. Il semble aujourd'hui toutefois exclu de mettre en œuvre un véritable traitement en ligne.

Les incertitudes de ce concept portent sur la capacité à assurer le traitement de volumes très importants, à gérer la non-homogénéité du mélange de sels fondus, à avoir des matériaux supportant la corrosion par les sels fondus en présence des produits de fission et à éviter la dégradation trop rapide du graphite sous irradiation et en présence de ces sels. Par ailleurs, les actions de maintenance et de réparation dans un environnement très radioactif nécessiteront une robotisation ; les coûts de démantèlement du réacteur et de l'unité de traitement des sels représenteront des charges importantes qu'il reste à chiffrer. Enfin, pour ce qui est de la sûreté, une approche nouvelle est à prévoir pour assurer la fonction de confinement dans ce concept particulier, sans première barrière, où le combustible est fondu en fonctionnement normal, et circule entre le réacteur et l'unité de traitement. Une analyse de sûreté équivalente à celle des autres réacteurs reste à faire.

Il est enfin utile de noter que les travaux menés dans ce cadre peuvent trouver d'autres débouchés que ceux d'un prototype MSR :

- les sels fondus : ils peuvent être utilisés comme caloporteur pour le circuit secondaire des SFR grâce à leurs excellentes propriétés thermodynamiques (stabilité, haute température, etc.) ;
- pyrochimie, qui constitue la seule solution pour des combustibles passés tels que les combustibles de RNR-Na à joint sodium, ou des cibles très peu solubles envisagées dans les méthodes de recyclage hétérogène des actinides mineurs ;
- cycle thorium : le thorium, matière fertile qui peut remplacer l'U238, peut être utilisé en réacteurs plus classiques (réacteurs à eau légère) en association avec une matière fissile (U235 ou Pu issu de l'irradiation de l'U238 ou U233 issu de l'irradiation du Thorium). Le déploiement de ce cycle, qui ne permet pas d'atteindre l'isogénération et donc l'objectif de durabilité, a l'inconvénient de nécessiter de nouveaux investissements industriels dont le coût sera élevé pour construire des usines du cycle adaptées (traitement et fabrication du combustible). Néanmoins, il pourrait s'avérer intéressant, dans le cas de difficultés dans la mise au point des réacteurs rapides de 4^{ème} génération, conjuguée à une pénurie en uranium naturel.

5.4.5.3.5 *Le cycle du combustible*

En parallèle de ces actions menées sur les réacteurs, des phases similaires de R&D devront se dérouler sur le combustible et son traitement, qui est une option obligée pour les réacteurs à neutrons rapides. Un tronc commun de R&D existe pour les différents systèmes mais les étapes de dissolution et de re-fabrication du combustible restent spécifiques de la technologie du combustible et donc du type de réacteur.

Concernant les technologies de traitement, deux grandes voies sont aujourd'hui envisageables :

- d'une part les procédés hydrométallurgiques qui ont à leur actif le retour d'expérience industriel des usines de La Hague et offrent un potentiel d'adaptation, notamment pour la mise en œuvre des procédés de séparation des actinides mineurs. Ils sont considérés comme la voie de référence pour le développement de concepts de cycles « avancés » pour la quatrième génération de réacteurs ;
- d'autre part, les procédés pyrométallurgiques qui consistent à mettre en solution des éléments à séparer dans un bain de sels fondus à haute température puis à opérer la séparation des espèces d'intérêt par des techniques diverses. La stratégie de développement éventuel se fonde sur une première phase d'évaluation de leur potentialité, en particulier sur le fait de savoir s'ils permettent effectivement une récupération quantitative et sélective des actinides. Les résultats de cette phase sont attendus aux environs de 2008-2010. D'ici à cette échéance, les travaux menés dans cette voie doivent donc rester limités.

Au-delà de ce premier choix structurant, l'élaboration de la stratégie de recherche dans le domaine du cycle du combustible nécessite de préciser les ambitions retenues pour la gestion des actinides mineurs, c'est à dire la mise en œuvre ou non de la séparation de ces éléments des produits de fission, dans le but de les transmuter ensuite. Il s'agit là d'un point fondamental pour la conception des usines du cycle, que ce soit les installations de fabrication du combustible ou celles de traitement des combustibles usés.

Sur ce sujet précis, les orientations fixées en France, notamment dans la récente loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs, -sans être contradictoires- ne sont pas strictement identiques aux objectifs du Forum Génération IV qui prévoit un recyclage groupé des actinides. En effet, ce n'est qu'après le bilan exhaustif prévu en 2012 par cette loi et les étapes de démonstration programmées au cours de la décennie 2020-2030 sur les aspects traitement, fabrication et transmutation, que le choix pourra être fait d'inclure ou non la séparation des actinides mineurs et leur transmutation respectivement dans le cahier des charges des futures usines du cycle et dans celui des réacteurs de quatrième génération. Au-delà, de façon à prendre des décisions étayées dans ce domaine à l'horizon 2030 -2035, il convient de mener une analyse comparative complète et d'étudier précisément les deux sujets suivants : la mise en œuvre du procédé COEX, éventuellement associé à la séparation poussée des actinides mineurs (DIAMEX SANEX) en vue d'un recyclage en mode hétérogène ou mise en œuvre d'une séparation groupée (6 ANEX) associée à un recyclage homogène. Le choix de la transmutation en mode homogène ou hétérogène devra également être effectué à la même période 2030-2035, car, par exemple, le choix du mode hétérogène revient à choisir la séparation poussée.

Pour la France, et concernant les systèmes de quatrième génération, quatre enjeux essentiels sont aujourd'hui identifiés :

- préparer le remplacement des installations de La Hague à l'horizon 2040, par une usine pouvant traiter des combustibles usés des réacteurs à eau pressurisée de troisième génération et le cas échéant des réacteurs de 4^{ème} génération ;
- assurer la disponibilité d'usines de fabrication de combustibles pour la mise en service éventuelle de réacteurs rapides de quatrième génération en 2040 ;
- après y avoir contribué, être capable de s'adapter aux nouvelles approches sur les risques de prolifération qui orientent vers des procédés dans lesquels le plutonium n'est récupérable, de façon isolée, à aucun endroit du processus ;
- fournir le combustible qui sera nécessaire au prototype SFR de la décennie 2020-2030, s'il est décidé, ainsi que le combustible nécessaire aux expériences de transmutation.

Un programme de recherche portant non seulement sur les combustibles mais aussi sur l'étape de traitement est prévu pour répondre à ces différents enjeux.

Concernant les combustibles MOX « standard » (c'est à dire comprenant un mélange uranium-plutonium sans actinides mineurs), les principaux travaux envisagés consisteront à améliorer le gainage utilisé dans le réacteur Superphénix, de façon à en augmenter le taux de combustion et par conséquent à diminuer le coût du kWh produit. Une des difficultés sera de trouver des réacteurs permettant de tester en irradiation les matériaux candidats, puis l'aiguille, voire l'assemblage combustible. Pour les irradiations de matériaux, on peut penser au réacteur Jules Horowitz, mais pour le combustible, il faudra passer par une coopération avec les Japonais (JOYO) ou les Russes (BOR60) pour les irradiations en situation normale et envisager de remettre en service une nouvelle installation de type CABRI fonctionnant avec une boucle au sodium pour tester le comportement du combustible en situation accidentelle. Les USA examinent la remise en service de TREAT, installation ressemblant à CABRI, qui a été mise sous cocon avec sa boucle sodium, laquelle a été remplacée par un boucle à eau sur CABRI. Il sera en outre nécessaire de disposer d'une capacité à fabriquer le combustible MOX pour fournir les assemblages du premier cœur et les recharges du prototype SFR soit dans l'usine existante MELOX avec les adaptations réglementaires nécessaires, soit dans un nouvel atelier à construire. Le démarrage de cette fabrication serait envisagé pour 2020 et le 1^{er} cœur pour le prototype SFR serait disponible 3 ans après. Il est à noter que le traitement des combustibles MOX usés dans l'usine actuelle de La Hague pour fournir le combustible de démarrage des RNR Generation IV doit être fait en dilution avec des combustibles UOX. Ce point nécessite quelques travaux de R&D menés dans le cadre de la loi sur les déchets.

Concernant le traitement, les experts estiment aujourd'hui que l'installation ATALANTE exploitée par le CEA permettra d'obtenir d'ici à 2020 les démonstrations de faisabilité technique nécessaires concernant l'étape de séparation (qu'elle soit de type COEX ou plus innovante) ; en revanche, un

« micro pilote » de fabrication sera probablement nécessaire pour démontrer la faisabilité technologique des étapes de co-conversion et de fabrication dans le cas d'assemblages ou de cibles contenant des actinides mineurs. En outre, selon les spécialistes, les principales difficultés restantes se concentreraient sur ces deux derniers sujets.

Il est difficile de programmer dès aujourd'hui avec précision la nature des tests d'irradiation qui seront à conduire entre 2020 et 2030 dans le réacteur prototype. Dans le cas où l'intérêt de réacteurs rapides se confirmerait à cette période pour l'horizon 2040, il serait probablement prioritaire de tester dans ce cadre le comportement de combustibles MOX standard puis, une fois les démonstrations technologiques obtenues, d'envisager, dans un second temps, des expériences de transmutation. Dans le cas contraire, une stratégie différente pourrait être retenue. Ces éléments devront être affinés à partir de 2012 lors de l'élaboration du cahier des charges du prototype.

2007-2012	<ul style="list-style-type: none"> • poursuite des études menées sur les différents procédés de traitement, que ce soit le procédé COEX ou ceux permettant la séparation des actinides mineurs (séparation poussée, séparation groupée ...). Pour ce faire, l'installation ATALANTE exploitée par le CEA sur le site de Marcoule sera utilisée. • premières analyses technico-économiques relatives aux installations du cycle qui seraient nécessaires pour les deux stratégies envisagées (mise en œuvre ou non de la séparation poussée / transmutation). • étude des apports d'une stratégie de séparation poussée / transmutation pour le stockage en couche géologique profonde. • études de scénarios permettant de tester l'intérêt de la séparation poussée / transmutation en intégrant les données technico-économiques et les apports éventuels pour le stockage en couche géologique profonde.
2012 (loi de 2006)	<ul style="list-style-type: none"> • comparaison de la faisabilité de ces différents procédés de traitement. • présentation d'un bilan technico-économique sur la séparation poussée / transmutation et décision de poursuivre ou non les recherches dans cette voie. • le cas échéant, choix d'un procédé de référence pour la séparation des actinides mineurs.
2012-2020	<ul style="list-style-type: none"> • consolidation des choix effectués, avec en particulier la conception d'une usine pour la fabrication de combustibles pour le réacteur prototype prévu dans la décennie 2020-2030 ainsi que, le cas échéant, la conception d'un « micro pilote » pour la fabrication de combustibles contenant des actinides mineurs. • poursuite des analyses technico-économiques sur les installations du cycle et des études de scénarios.
2020-2030	<ul style="list-style-type: none"> • démarrage de la fabrication du combustible standard de type MOX pour le réacteur prototype ; • fabrication des combustibles ou cibles contenant des actinides mineurs pour le réacteur prototype à partir du « micro pilote ».
2030-2035	<ul style="list-style-type: none"> • spécifications et choix de conception pour les installations visant à remplacer les installations actuelles de la Hague, dans le cas où cette décision serait prise à l'horizon 2040.

Tableau 26 – principaux jalons de la recherche sur le cycle du combustible

5.4.6 Fission : Stratégie de recherche retenue pour les systèmes nucléaires du futur

5.4.6.1 Les orientations générales

La question des ressources reste citée comme une préoccupation majeure par les acteurs, mais sans que les prévisions ou les modèles dans ce domaine aient été affinés. Par ailleurs, les usages non électrogènes de l'énergie nucléaire font encore l'objet de réflexions sans que la stratégie industrielle en la matière soit véritablement arrêtée.

Dans ces conditions, il semble que quelques principes fondamentaux peuvent être arrêtés au stade

actuel :

- l'utilisation prioritaire des crédits publics pour l'étude des utilisations électrogènes et plus précisément des concepts SFR et GFR ;
- l'accompagnement par le CEA d'une stratégie industrielle d'AREVA pour le développement des applications non électrogène. Les besoins et le marché doivent être encore précisés (production massive d'hydrogène, fourniture de chaleur pour les procédés industriels, carburants synthétiques à partir de charbon ou de biomasse). Dans ce contexte, la stratégie de recherche correspondante devra être définie avec les industriels concernés en fonction des financements qu'ils apportent.

En outre, il serait utile d'affiner au cours des 5 à 10 prochaines années la vision stratégique française sur la disponibilité de l'uranium naturel. Un observatoire pourrait être constitué, pour examiner les conséquences sur le marché de l'uranium de l'évolution des trois facteurs suivants :

- la réserve en uranium ;
- les besoins au niveau du parc mondial (électrogène ou non) ;
- les performances dans l'utilisation du combustible des réacteurs actuels.

5.4.6.2 Les orientations stratégiques pour les recherches menées sur les applications électrogènes

Dans le cas français, il apparaît le besoin de disposer vers 2040 d'une option permettant d'introduire un RNR dans le parc de production nucléaire à cette date. EDF est favorable au développement de cette option qui constitue une assurance pour faire face à des tensions sur le marché de l'uranium, tensions qui résulteraient d'une croissance forte de l'énergie nucléaire dans le monde et de découvertes minières décevantes. Le besoin d'une telle option sera bien sûr à confirmer dans le futur. En outre, si elle était effectivement mise en œuvre, elle apporterait un intérêt complémentaire au traitement du combustible REP usé tel qu'il est pratiqué actuellement en France, en valorisant de façon optimale le plutonium contenu dans les Mox usés.

Ce besoin stratégique de disposer d'un réacteur rapide en 2040, ne semble aujourd'hui pouvoir être satisfait que par le SFR, compte tenu de sa plus grande maturité.

Dans ce cadre, la période 2006-2012 revêt une importance particulière, car elle devrait apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- un niveau satisfaisant de sûreté et de compétitivité peut-il être atteint dans le cas du SFR ?
- la pré-faisabilité du GFR est-elle atteinte, notamment concernant les deux incertitudes technologiques majeures que constituent la sûreté d'un tel concept et le développement de combustibles adaptés ?
- quel est le bilan technico-économique sur la séparation poussée / transmutation ?
- les tensions sur le marché de l'uranium se confirment-elles ? Le rythme de développement de l'électronucléaire dans le monde et le choix des grands pays (Chine, Inde, USA...) de pratiquer ou non le traitement-recyclage seront des éléments importants pour préciser la stratégie.

Tous ces éléments devraient permettre de préciser ou d'infléchir la stratégie à suivre.

En attendant, la stratégie de recherche suivante est proposée pour la période d'ici à 2012 :

- l'axe prioritaire de R&D sera constitué par les études menées sur le réacteur SFR, avec des objectifs concrets en matière de sûreté et de compétitivité ;
- en parallèle, dans la mesure où il n'est pas aujourd'hui acquis que les difficultés technologiques du SFR pourront être levées à un coût raisonnable, un effort sera maintenu sur le GFR dans la perspective de disposer d'une revue de pré faisabilité en 2012, à l'issue de laquelle sera instruite

l'opportunité d'entamer ou non le processus de réalisation du REDT. Le choix d'explorer cette voie s'explique aussi par son potentiel pour les applications de la haute température et par la possibilité d'en faire un projet fédérateur de 4^{ème} génération pour l'Europe.

5.4.6.3 Stratégie pour les autres systèmes

Il apparaît par ailleurs utile de maintenir l'activité de veille sur les réacteurs à sels fondus, les réacteurs à eau supercritique et les réacteurs au plomb auxquels certains pays européens s'intéressent. Il est à noter que dans le cas du réacteur à sels fondus, ce sont des applications dérivées (caloporteur à sels fondus, ou pyrochimie, voire cycle thorium) qu'il conviendrait aujourd'hui de valoriser, notamment dans une perspective de mutualisation avec les recherches menées sur les concepts SFR et GFR. Il serait utile que des propositions en ce sens soient faites par le CNRS, en lien avec le CEA.

5.4.6.4 Applications autres qu'électrogènes

Un cahier des charges précis devra être élaboré, notamment sous l'impulsion d'AREVA en fonction du marché pressenti, surtout pour des applications de type « Coal to Liquid » et « Biomass to Liquid » (fabrication de pétrole à partir de charbon ou de biomasse) ou dans l'évolution des technologies de raffinage/upgrading de pétroles lourds. Ce cahier des charges devrait préciser entre autres le procédé de fabrication de l'hydrogène nécessaire avec la fourniture de chaleur et d'électricité pour ces objectifs.

La production massive d'hydrogène qui ne semble pas avoir aujourd'hui de marché (comme application des réacteurs de IV^{ème} génération), est ici envisagée soit par voie d'électrolyse soit par voie thermochimique. On finalisera pour 2008 les travaux entrepris sur le cycle thermochimique Iode/Soufre de façon à préciser le coût de l'hydrogène attendu pour cette méthode et sa comparaison avec celui de l'électrolyse à haute, moyenne et basse température. En fonction de ces résultats, et de l'intérêt affiché par les industriels, on pourra décider de donner ou non une suite au programme actuellement engagé.

Il est à noter que si un marché important apparaissait, l'effort à faire sur ces réacteurs viendra concurrencer les travaux sur les RNR.

5.4.6.5 En ce qui concerne le cycle

L'échéance de 2012 apparaît dans ce domaine également primordiale, notamment pour présenter une analyse systématique des différents procédés de traitement envisageables (avec ou sans séparation des actinides mineurs), une comparaison des deux stratégies globales étudiées (mise en œuvre ou non de la séparation poussée/transmutation) et les résultats des premières études d'ingénierie sur les futures installations du cycle.

Dans ce domaine, une très forte interaction existe avec les programmes de recherche qui seront menés dans le cadre de la loi du 28 juin 2006. Il semble donc crucial, qu'au sein des différentes entités concernées, un lien étroit puisse être assuré entre les équipes travaillant sur ces sujets et celles en charge du développement des systèmes de quatrième génération.

Dans le cas plus précis du CEA, qui sera l'organisme en pointe sur ces thématiques, il serait souhaitable qu'un Comité de pilotage commun aux deux problématiques soit mis en œuvre dans les meilleurs délais. Il devra en particulier s'assurer que les études menées sur les procédés de traitement prennent suffisamment en compte les contraintes liées au fonctionnement des réacteurs et inversement que les combustibles de ces réacteurs soient traitables par des procédés industriels.

En particulier, les experts dans ce domaine préconisent que le démarrage éventuel de réacteurs de quatrième génération à l'horizon 2040 puisse s'effectuer de façon « simple », c'est à dire sans prise en charge des actinides mineurs, au moins dans un premier temps. Ceci conduit à des contraintes au niveau du cycle, en particulier pour disposer d'un procédé de traitement adaptable et modulaire permettant non seulement la fabrication de combustibles standards uranium-plutonium mais aussi, dans un second temps, la séparation des actinides mineurs dans la perspective de leur transmutation. Les recherches aujourd'hui menées permettent d'envisager cette option (faisabilité du procédé DIAMEX + SANEX) pour une gestion hétérogène, mais pas homogène. Une évaluation des

perspectives industrielles de ces procédés sera faite dans le cadre de l'examen prévu en 2012 par la loi du 28 juin 2006 et au-delà, lors des étapes de démonstration prévue à l'horizon 2020-2030 que ce soit pour les étapes de co-conversion et de fabrication mais aussi pour la transmutation.

5.4.7 Fission : Collaborations internationales pour les systèmes du futur

En ce qui concerne le SFR, la volonté d'avancer rapidement sur un concept en forte innovation, avec la réalisation d'un prototype en France, conduit à privilégier l'action d'un consortium français à monter entre AREVA, EDF et le CEA, ce qui n'exclut pas la participation éventuelle de partenaires étrangers. Sur certains points, notamment ceux devant déboucher sur des standards internationaux (sûreté, non-prolifération) des échanges avec des organismes étrangers seront nécessaires. - Sur ces sujets, (et d'autres, comme le partage de grosses installations ...), des collaborations dans le cadre de Génération IV sont à rechercher.. Des collaborations bilatérales équilibrées sont également possibles sur ces thèmes avec des partenaires étrangers.

Pour le GFR, la collaboration dans le cadre du Forum Génération IV est à poursuivre, en particulier pour établir le tour de table permettant de lancer après 2012, le cas échéant, la construction du REDT, outil indispensable pour garder une dynamique sur cette filière. Un soutien de la communauté européenne au travers de son implication dans le Forum Génération IV est également à rechercher et pourrait conduire à la réalisation du REDT dans un pays européen.

Enfin, en ce qui concerne, le (V)HTR, le soutien à AREVA dirigera les actions à entreprendre autant au plan national que dans le cadre Génération IV.

Pour le cycle, certaines actions comme l'atelier pilote ou les irradiations dans MONJU pourraient être entreprises dans un cadre spécifique de coopération internationale, d'autres relèvent plus d'un soutien à AREVA ou de réponses à la loi du 28 juin 2006.

5.4.8 Fission : Synthèse du programme de travail pour les systèmes nucléaires du futur

Dans le tableau suivant, on rassemble les principaux jalons apparus pour les réacteurs de 4^{ème} génération et on les met en regard de ceux prévus par loi de 2006 concernant les déchets. Les actions hydrogène prévues dans le cadre du Forum Generation IV sont également présentées.

Tableau 27 – principaux jalons

	(V)HTR	RNR-Na	RNR-G	Cycle	Hydrogène	Transmutation	Loi déchets
2006	Etudes de marché	Choix des options de la filière : -compétitivité -améliorations en rupture par rapport à EFR et SPX	Levée des verrous technologiques -combustible -sûreté	Travaux devant conduire au choix du procédé de référence	Action CTC (Japon, USA, F)		Vote de la loi
2008	Décision AREVA de poursuivre				Comparaison technico-économique CTC, EHT, électrolyse alcaline	Essais de transmutation dans PX jusqu'en 2009 et examens après irradiation jusqu'en 2012	
2012		Décision de poursuivre Choix des options du RNR-Na	Décision de poursuivre	Choix du procédé de référence		Comparaison ADS/RNR Procédé cycle de référence Poursuite de la transmutation ? (oui ou non)	Evaluation des perspectives industrielles des filières de transmutation

2015				2012-2020 Consolidation du choix Préparation de l'atelier pilote avec APS poussée et groupée			Autorisation de construction d'un stockage réversible
2020		Démarrage de la fabrication du comb. MOX pour prototype RNR-Na et REDT		Démarrage de l'atelier pilote pour démonstration co-conversion et fabrication		Essais de transmutation dans MONJU et JOYO.	Démarrage d'un prototype d'installation de transmutation
2023		Démarrage du prototype. Cœur MOX sans AM	Démarrage du REDT	2020-2030 Fabrication de combustible et/ou cibles pour la transmutation pour MONJU, proto RNR-Na, REDT		Transmutation dans MONJU d'assemblages fabriqués dans l'atelier pilote	
2030	Expérience de transmutation hétérogène et homogène d'assemblages fabriqués dans l'atelier pilote	Irradiations dans le REDT : Améliorations du combustible RNR-gaz Sans et avec AM				Transmutation dans prototype RNR-Na Transmutation dans REDT	
2035	Tête de série				Spécifications nouvelle usine : • Procédé définitif • Déf. des flux à traiter • Choix du comb. RNR.		Stratégie de transmutation : • AM Oui/non • Homo/cible • RNR-Na/gaz Besoins nouvelle usine
2040		Option RNR-Na disponible pour parc EDF		Démarrage nouvelle usine La Hague			
2050		Prototype pour transmutation		Ateliers complémentaires selon stratégie transmutation		Prototype pour transmutation	
2060		Tête de série transmutation				Tête de série transmutation	

5.4.9 Fission : Les moyens budgétaires associés pour les systèmes du futur.

Les chiffres suivants sont donnés à titre indicatif : ils sont à prendre comme des ordres de grandeurs des moyens qui seront nécessaires pour mener à bien la phase 2007-2012. Ils dépendront des choix qui seront faits au cours de l'évolution du programme, d'étudier un éventail de solutions plus ou moins large.

Ces chiffres ne concernent que les réacteurs rapides, les budgets des autres systèmes (réacteurs à eau supercritique, à sels fondus et (V)HTR) étant bien inférieurs aux incertitudes sur les chiffres donnés, sauf si une accélération du programme (V)HTR devait être décidée d'ici 2012.

Tableau 28 –Principaux budgets

Coût complet (M€)	2006	2007	2008	2009	Moyenne 2010 – 2012	Total 2006-2012 (Ordre de grandeur)
RNR-Na	9,1	28	43	57	74	360
RNR-gaz	21,8	26	27	27	28	190
Cycle	28,6	38	46	50	58	340
Total	59,5	92	116	134	160	890

5.4.10 Fusion

5.4.10.1 La fusion nucléaire comme source d'énergie : principe

Pour obtenir une réaction de fusion, il faut réussir à rapprocher suffisamment deux noyaux, qui, puisqu'ils sont tous deux chargés positivement, se repoussent. Pour y parvenir, il faut porter et maintenir ces noyaux à des températures qui dépassent la centaine de millions de degrés. A ces températures, les atomes sont ionisés et constituent un plasma.

Les recherches sur la fusion contrôlée se concentrent sur la réaction de fusion la plus accessible, impliquant le deutérium et le tritium : $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$. L'énergie de cette réaction est 17.6 MeV, la majeure partie de cette énergie est portée par les neutrons (14 MeV), les noyaux d'hélium formés emportant une énergie de 3,6 MeV.

Pour que le combustible, à l'état de plasma, puisse produire suffisamment de réactions thermonucléaires, il faut le maintenir dans un volume limité et l'éloigner de toute paroi matérielle afin de maintenir sa température élevée : c'est le confinement. Nous nous limiterons dans ce rapport au confinement magnétique, qui consiste à maintenir le plasma dans une boîte immatérielle créée par des champs magnétiques. Le concept le plus développé, dans la voie du confinement magnétique, est celui du tokamak²⁰, où la boîte est de forme torique. Un ensemble de bobines produit un champ magnétique dans la direction du tore, auquel se superpose le champ magnétique créé par un courant intense axial circulant dans le plasma lui-même. Les lignes de champ qui en résultent décrivent alors des hélices sur une surface torique. Ce sont des scientifiques russes qui ont été les premiers à produire un plasma d'une dizaine de millions de degrés dans un réacteur de recherche appelé tokamak en 1968.

Quelle que soit la façon dont on a créé le plasma à l'intérieur d'une structure de confinement, il n'a jamais d'emblée la température requise pour les réactions de fusion, il faut donc fournir de l'énergie au plasma pour le chauffer. Pour que la fusion soit utilisable comme source d'énergie, il est nécessaire que la puissance fournie par la fusion P_{fus} soit supérieure à celle que l'on injecte pour chauffer et maintenir le plasma à la température voulue.

Pour que la réaction de fusion se fasse avec un coefficient d'amplification $Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{ext}}$ donné, à une température de fonctionnement donnée²¹, il faut que le produit de la densité du plasma n par son temps de confinement²² τ dépasse une certaine valeur (« critère de Lawson »). Dans le cas de la fusion magnétique, c'est essentiellement en progressant sur le temps de confinement qu'on augmente le produit $n\tau$. Ce temps de confinement varie avec le carré du grand rayon du plasma. Cet effet de taille est une des caractéristiques des installations de fusion : les plasmas performants sont obtenus dans des installations de grande taille.

²⁰ Ce terme vient du russe : « toroidalnaja kamera magnetnaja katuska » (chambre toroïdale à confinement magnétique)

²¹ de l'ordre d'un centaine de millions de degrés

²² C'est la durée pendant laquelle l'énergie reste confinée dans le plasma. Elle traduit la capacité du plasma à conserver sa chaleur.

Si le coefficient d'amplification vaut 1, le plasma fournit autant d'énergie qu'on lui en injecte, cette condition s'appelle le break-even. L'énergie portée par les noyaux d'hélium produits par les réactions de fusion reste confinée dans le plasma et contribue à son chauffage. Si le nombre de réactions de fusion est suffisant pour que cette contribution soit égale à l'énergie perdue par le plasma, alors il n'est plus nécessaire d'apporter de l'énergie extérieure pour chauffer le plasma, on dit que le plasma est auto-entretenu ou en ignition. Le facteur d'amplification devient alors infini.

En pratique, le plus grand facteur d'amplification atteint à ce jour a été obtenu au JET, avec une puissance de fusion de 16 MW pour 25 MW injectés, soit $Q=0,64$, les conditions atteintes sont donc proches du break even.

Dans l'optique d'un réacteur de fusion électrogène, il faudrait atteindre des conditions proches de l'ignition, dans lesquelles les noyaux d'hélium produits par les réactions de fusion suffisent à chauffer le plasma. Un certain nombre de questions d'ordre scientifique et technologique, sont à résoudre, notamment :

- la production de tritium au sein de la machine : dans de tels systèmes, les neutrons issus de la réaction de fusion produiraient en continu, par interaction avec des couvertures en lithium et utilisant des multiplicateurs de neutrons (couvertures tritigènes), le tritium consommé dans le plasma, évitant ainsi le transport de cet élément radioactif. La quantité totale de tritium présente dans la chambre à vide d'une installation de type industriel ne serait que de quelques grammes. Cependant le tritium diffuse aisément dans les matériaux. Le contrôle de sa diffusion, que l'on sait réaliser, est un aspect important de la sûreté ;
- la tenue des matériaux au contact du plasma : dans un système industriel, la première paroi devrait évacuer une densité de puissance très importante (elle peut dépasser localement 20 MW/m^2), et supporter les flux de neutrons très élevés qui la traversent pour atteindre les couvertures tritigènes. La mise au point, dans les années quatre-vingt, du « divertor », configuration magnétique particulière permettant de mieux gérer les flux à évacuer du plasma, a beaucoup contribué aux progrès effectués au cours des deux dernières décennies ;
- la minimisation de l'activation des matériaux de couverture : les neutrons interagissant avec les parois provoquent, par réactions nucléaires, l'apparition d'éléments radioactifs. Le choix de la composition des matériaux de couverture doit être tel qu'il minimise, en niveau et en durée, la production de la radioactivité induite.

Les avantages potentiels de la fusion à des fins électrogènes sont nombreux :

- les ressources en combustible, deutérium et lithium, sont quasiment illimitées. Le deutérium est présent à l'état naturel dans l'eau (33 g/m^3) et le tritium peut être produit à partir du lithium, élément présent dans les roches et l'eau de mer (2 grammes par tonne dans la croûte terrestre et 0.18 g/m^3 dans les océans) ;
- la réaction de fusion, comme celle de fission ne produit pas de gaz à effet de serre ; elle ne produit que de l'hélium et des neutrons ;
- la fusion est passivement sûre. La réaction se produit dans quelques grammes de gaz à très haute température. Il est facile de l'arrêter en coupant l'alimentation en combustible. De plus, toute perturbation non désirée refroidit cette petite quantité de gaz et arrête la réaction ;
- elle ne produit aucun déchet radioactif de type actinides.
- un réacteur de fusion ne présente pas de risques de prolifération vis-à-vis d'isotopes fissibles.

5.4.10.2 Bref historique de la recherche sur la fusion

Les recherches effectuées jusqu'à maintenant en Europe, sous l'égide d'Euratom, avec entre autres les installations Tore Supra et JET, ainsi que dans le monde avec l'installation JT 60 au Japon et l'installation TFTR aux USA en particulier, ont été essentielles dans le développement de l'énergie de

fusion nucléaire. Ces recherches ont permis :

- de progresser dans la connaissance et le diagnostic (systèmes de mesure) de la physique des plasmas,
- de faire progresser les performances globales des plasmas,
- de concevoir et fabriquer des composants spécifiques (bobines supraconductrices, matériaux capables de résister à des hauts flux thermiques, systèmes de chauffage du plasma...)
- de développer des matériaux à faible activation et d'étudier leur comportement.

Elles permettent désormais d'envisager la construction d'une nouvelle machine expérimentale intégrant la plupart des technologies nécessaires à l'échelle d'un futur réacteur à fusion produisant de l'électricité. Jusque dans les années 1990, l'objectif des études sur la fusion nucléaire était de créer et de maintenir un gaz à très haute température (un plasma) afin d'y déclencher des réactions de fusion. La communauté des chercheurs et ingénieurs impliqués dans les études sur la fusion contrôlée magnétique est maintenant prête à effectuer un pas supplémentaire : démontrer la maîtrise de la combustion entretenue d'un plasma deutérium-tritium sur des temps longs. Il s'agit de développer les technologies nécessaires à un réacteur de fusion et de mettre au point des matériaux suffisamment robustes pour pouvoir supporter des années d'opération dans l'environnement hostile d'un réacteur.

Les prochaines étapes majeures du programme de recherche sur la fusion sont la construction d'ITER (International Tokamak Experimental Reactor), dont la taille est proche de celle d'un réacteur, et d'IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility), une installation qui permettra de mettre au point les matériaux. Ce sont les étapes préalables à la réalisation d'un démonstrateur préindustriel (DEMO). Le projet ITER contribue à structurer les recherches sur la fusion qui se développent dans un cadre international. Ces recherches se caractérisent par une multidisciplinarité allant de la physique des plasmas (recherche fondamentale) jusqu'aux technologies les plus avancées (objectifs technologiques).

5.4.10.3 Le projet ITER

5.4.10.3.1 Positionnement et objectifs

Ce projet international rassemble aujourd'hui la Chine, les Etats Unis, la Fédération de Russie, l'Inde, le Japon, la République de Corée, l'Union Européenne, soit plus de la moitié de la population mondiale.

L'objectif programmé global du projet ITER consiste à démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion à des fins pacifiques.

Le projet ITER pourra atteindre cet objectif en faisant la démonstration de l'amplification d'énergie par un facteur d'au moins 10 à défaut de l'ignition contrôlée et de la combustion étendue des plasmas deutérium-tritium avec, pour objectif ultime, de parvenir à un régime permanent, en faisant la démonstration des technologies essentielles à un réacteur dans un système intégré, et en effectuant des tests intégrés des composants à haut flux d'énergie et des composants nécessaires pour utiliser l'énergie de fusion à des fins pratiques.

Avec ITER, l'objectif sera d'obtenir une réaction de fusion de 500 MW à partir d'une énergie de 50MW, soit une énergie dix fois supérieure à celle qui aura été fournie ($Q=10$). Le volume du plasma sera de 840 m^3 (à titre de comparaison, les volumes des plasmas de Tore Supra et du JET sont respectivement de 25 m^3 et de 100 m^3).

Dans le cadre de ce programme, il s'agit aussi de tester des concepts et équipements pour le futur réacteur de fusion produisant de l'électricité, ce qui suppose de :

- développer des systèmes et composants nécessaires pour contrôler un plasma et maintenir sa combustion en état stationnaire. Le défi sera double : réaliser des centaines de composants de façon industrielle et satisfaire toutes les conditions expérimentales choisies ;
- réaliser des expérimentations de production de tritium à l'intérieur de la machine. L'enjeu à plus long terme sera de disposer des technologies nécessaires à la réalisation d'un dispositif complet, élément essentiel du réacteur de fusion produisant de l'électricité ;
- devoir se passer de l'intervention humaine à l'intérieur de la machine lorsqu'elle fonctionnera avec du tritium. Dans cet objectif, plusieurs concepts de robots sont en cours de développement dans le cadre de collaborations industrielles pour des opérations diverses (découpe, soudage, missions d'inspection, de prélèvement d'échantillons, d'aspiration de particules de poussière ou encore des opérations d'installation et de maintenance de certains composants à l'intérieur de la machine).

La conception du réacteur ITER s'appuie sur des connaissances scientifiques et des extrapolations dérivées de l'exploitation de tokamaks au niveau mondial pendant les dernières décennies, ainsi que sur le savoir-faire technique découlant des programmes de R et D dans le domaine de la technologie de la fusion à travers le monde. Ce concept a été validé par des travaux de physique et d'ingénierie de grande ampleur, comprenant des analyses détaillées, des expériences spécifiques au sein des installations existantes de recherche sur la fusion et des développements et tests technologiques dédiés.

5.4.10.3.2 Principales phases du programme

Le déroulement du projet comporte deux phases essentielles :

- La première phase durera environ 10 ans, il s'agit de la construction de la machine et des infrastructures associées sur le site de Cadarache (2007-2015).
- La deuxième phase consistera en une vingtaine d'années d'exploitation scientifique, de recherches, de développements technologiques et de validations expérimentales (2015-2035). A l'issue de la décision de cessation définitive d'exploitation, la phase de démantèlement (y compris la phase d'assainissement) est envisagée sur 15/20 ans.

5.4.10.3.3 Actions menées en parallèle d'ITER

Les études de matériaux pour la fusion, IFMIF et l'approche élargie.

La qualification des matériaux résistant aux conditions spécifiques de la fusion est un élément majeur dans la stratégie du déploiement des réacteurs de production d'énergie par fusion. Une installation d'irradiation dédiée, IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), est en projet depuis 1994 sous l'égide de l'IEA (International Energy Agency) pour répondre à cette particularité des besoins. La qualification des matériaux candidats au réacteur de fusion DEMO, et l'identification de possibles nouveaux phénomènes induits par l'exposition aux neutrons de haute énergie sont parmi les missions de cette installation. IFMIF consiste en deux accélérateurs de 125 mA de deutons à 40 MeV, délivrant en parallèle et en continu leurs faisceaux sur une cible de lithium liquide.

5.4.10.3.4 L'après ITER

DEMO et schéma de développement général

Après ITER, un prototype industriel (DEMO) produisant de l'électricité (1 GW électrique) devrait être construit entre 2030 et 2040 pour démontrer que l'énergie de fusion produite pourra être transformée en électricité dans des conditions industrielles et économiques satisfaisantes. Pour une bonne rentabilité énergétique, les études réalisées montrent que le coefficient d'amplification de la puissance

devra alors être de l'ordre de 30.

L'un des objectifs technologiques du prototype DEMO consistera notamment à valider le principe de production de tritium, à partir d'éléments en lithium, à l'intérieur de la machine. DEMO utilisera aussi des matériaux capables de résister à des flux de neutrons de haute énergie. Il servira également à tester l'efficacité technique et économique du système de production de l'électricité qui consiste à transmettre l'énergie libérée par les réactions de fusion à un circuit de refroidissement (eau sous pression, hélium...). La chaleur ainsi transportée vers un échangeur sera alors cédée à un second circuit. Transformée en vapeur d'eau, l'eau de ce circuit actionnera les turbines qui produiront de l'électricité.

Le prototype DEMO validera la faisabilité de la production d'énergie via la fusion thermonucléaire non seulement au niveau de la physique mais aussi au niveau de la majeure partie des grands composants d'un réacteur (bobines supraconductrices de grande taille par exemple). Les performances en terme de confinement plasma demandées à un réacteur électrogène ne sont que 4 à 5 fois supérieures aux performances nominales du projet ITER. On peut raisonnablement estimer que les premiers kW électriques produits par un prototype de réacteur à fusion thermonucléaire puissent voir le jour à l'horizon 2050 soit environ cent ans après le début des recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée.

5.4.10.3.5 ITER et les conséquences pour le programme de fusion français :

L'engagement européen dans le programme ITER s'accompagne d'une forte amplification du programme de recherche en fusion en Europe puisque la Commission européenne prévoit de soutenir dans le cadre du 7^{ème} PCRD un important programme d'accompagnement en complément à ITER. Il est essentiel que la France accorde une haute priorité non seulement à ses contributions à la réalisation matérielle de l'installation mais aussi au succès scientifique de l'entreprise, dont le caractère international constitue une opportunité unique pour le développement des recherches nationales en fusion et dans les disciplines connexes.

Il est important de mener au sein des grands organismes de recherche et d'enseignement supérieur français (CEA, CNRS et Universités) un programme d'accompagnement fort en fusion magnétique, aussi bien en recherche fondamentale et appliquée, sciences physiques pour l'ingénieur, qu'en technologie. Il s'agit de participer aux actions à caractère scientifique accompagnant la construction et l'exploitation d'ITER, mais aussi de maintenir parallèlement à ITER des lignes de recherche originales permettant d'enrichir et de fertiliser l'ensemble de la discipline. Une réflexion sur la formation d'une fédération de recherche a été engagée entre les différents organismes, pour assurer une meilleure coordination et une meilleure visibilité de l'ensemble.

Un autre volet consiste à mettre en place des formations supérieures adaptées pour disposer en France, en temps et en heure, d'une communauté scientifique de grande qualité indispensable à la réussite de l'entreprise (master fusion).

5.4.11 Actions transverses

Certaines actions de R&D sont utiles à la fois à la fusion et à la fission, il s'agit des travaux menés dans le domaine des données nucléaires et dans celui des matériaux.

5.4.11.1 Données nucléaires

Les données nucléaires relatives aux interactions entre les neutrons et la matière sont à la base de tous les calculs de simulation. du comportement des réacteurs nucléaires et des systèmes innovants.

Pour l'incinération des actinides mineurs dans les réacteurs du futur, on mesure actuellement les sections efficaces des réactions induites par les neutrons d'énergie allant de 100 keV à 15 MeV sur des cibles d'actinides mineurs : fission, capture radiative, diffusion inélastique et réactions (n, 2n). Des mesures de haute précision sont également réalisées dans le domaine thermique pour faciliter la

normalisation de certaines données acquises à plus haute énergie. Une bonne évaluation des données collectées permettra d'alimenter ou d'améliorer les bases de données, pour des prédictions de meilleure qualité. Les techniques expérimentales permettent également d'accéder aux distributions en masse et énergie des fragments de fission des actinides mineurs, distributions qui interviennent dans les calculs de puissance en phase d'incinération et dans l'émission de neutrons retardés. Une meilleure compréhension du processus de fission à haute énergie est attendue de mesures sur l'installation n-TOF au CERN.

Les programmes de mesure de données nucléaires, menés en étroite collaboration entre le CEA et le CNRS, se déroulent actuellement dans le cadre de deux projets européens (Eurotrans et Efnudat). Les mesures intégrales réalisées sur MASURCA, EOLE ou l'ILL, des mesures de réactivité par oscillation d'échantillons dans MINERVE et des irradiations dans les réacteurs de recherche français (PHENIX, OSIRIS puis RJH) ou étrangers (RHF, BOR 60 puis MONJU) permettront de normaliser les mesures différentielles effectuées dans divers laboratoires européens. Des synergies seront développées avec les études menées pour la criticité des installations du cycle des combustibles.

5.4.11.2 Matériaux sous irradiations

Les travaux sur les matériaux représentent une part cruciale des études pour les réacteurs du futur, tant de fission que de fusion.

Il s'agit d'une part d'établir expérimentalement le comportement des matériaux combustibles, qui peuvent être portés à température très élevée, et celui de matériaux de structure soumis à irradiation, éventuellement dans un environnement de haute température et/ou au contact de métaux liquides.. D'autre part, il s'agit de valider les résultats des simulations numériques, seules capables de guider des choix et de prédire des phénomènes nouveaux dans une liste quasi infinie de matériaux. Du point de vue des diagrammes de phase et des propriétés thermophysiques des matériaux, un important travail bibliographique a indiqué les incohérences ou inconnues à élucider. De nombreux travaux ont été menés dans le cadre du CPR ISMIR sur le Carbure de Silicium, matériau-clé pour tous les réacteurs à haute température : ils ont permis d'avancer dans la compréhension des défauts induits par l'irradiation, ainsi que des problèmes liés à la diffusion et précipitation. Les conclusions tirées de ces travaux détermineront les approfondissements nécessaires.

Ces travaux s'appuient sur des moyens expérimentaux importants. A côté de réacteurs d'irradiation (par exemple RJH), la mise en place de plates-formes partagées d'irradiation est en cours comme à Grenoble avec la plate-forme PEREN (impulsions de neutrons), au CIRIL/Caen (implantation d'ions lourds), à Orléans (faisceaux de protons et de particules α , faisceaux de positons). L'effort porte aussi sur les moyens de caractérisation : implantation d'une ligne chaude (MARS) sur SOLEIL, d'un système de RMN « en actif » à Marcoule, étude des matériaux en conditions extrêmes à Orléans (plusieurs dispositifs de RMN appliqués à des échantillons à haute température, caractérisation de défauts des matériaux par un faisceau de positons unique en France). Le système AIFIRA, à Bordeaux, sera une plate-forme d'irradiation neutrons et d'étude de l'interaction des radiations avec les cellules vivantes. Le projet JANNUS, sur les deux sites de Saclay et Orsay, fournira des dispositifs d'irradiation, d'implantation et de caractérisation in situ, permettra de suivre l'évolution microstructurale des matériaux sous irradiation et d'interpréter cette évolution au niveau nanométrique.

Des progrès ont aussi été faits sur les dispositifs d'étude de la radiolyse, en particulier à Orléans, au SCM/DSM de Saclay, avec le dispositif Elyse (impulsions picoseconde) à Orsay et sont attendus à Nantes (cyclotron).

En complément des travaux menés dans le cadre de IFMIF, un programme national de recherche portera sur la compréhension des mécanismes de fragilisation des matériaux, s'appuyant sur les installations existantes et des travaux théoriques.

5.5 Socio-économie

Transversalement aux domaines techniques, la socio-économie de l'énergie joue un rôle essentiel en étudiant prioritairement :

- Le cadrage général : observation, prospective, suivi des marchés, formation des prix, adéquation de l'offre et de la demande, ... ;
- Les coûts pour les usagers et les possibilités d'intervention économique de l'Etat ;
- Les déterminants des comportements des consommateurs qui, au bout du compte, décideront du succès des innovations techniques.

5.5.1 Economie de l'énergie

La discipline de l'analyse économique de l'énergie est depuis ces 10 dernières années confrontée à de nouveaux défis sous l'impulsion de l'ouverture des marchés, de la crise des prix des énergies et des efforts de préservation de l'environnement, notamment pour lutter contre le changement climatique. De nouvelles questions se posent et de nouveaux outils se développent du fait notamment de la place prépondérante de l'énergie (production et consommation) dans les émissions de gaz à effet de serre.

La recherche en économie de l'énergie a pour objet de comprendre ces évolutions, d'envisager les futurs les plus probables, de détecter les possibilités de rupture et d'en évaluer les conséquences sur les systèmes productifs, au Nord comme au Sud. Elle a également pour objet d'améliorer les instruments d'intervention des pouvoirs publics et d'en évaluer l'efficacité.

5.5.1.1 Les questionnements de recherche

5.5.1.1.1 L'observation des marchés et des acteurs de l'énergie

- Renforcement des moyens

Il convient de renforcer le dispositif français d'observation et d'analyse économique et stratégique existant (l'Observatoire de l'énergie, le CEREN, les services du Ministère des transports, les laboratoires universitaires...) face à une offre européenne de plus en plus active et efficace. Ainsi les positions britanniques, danoises, néerlandaises, etc., en matière de politique énergétique et/ou environnementales sont-elles systématiquement accompagnées d'études abondamment diffusées auprès des décideurs. Il serait utile de renforcer le lien entre, d'une part, les responsables de la mise au point de la politique énergétique française et les négociateurs français des accords européens et internationaux la concernant, d'autre part, les consultants, chercheurs et experts permettant d'étayer la position des pouvoirs publics français. Un exemple est le « Cycle de conférences de politique énergétique », organisé conjointement par la DGEMP et l'ex Commissariat général au Plan, qui permettait de confronter et de faire connaître les travaux en cours.

- Les indicateurs des politiques de l'énergie

Les indicateurs doivent être améliorés, notamment les statistiques permettant d'évaluer l'efficacité énergétique, le taux d'indépendance énergétique, le bouquet énergétique.

5.5.1.1.2 Prix et marchés de l'énergie

- Formation des prix et structure des marchés des énergies non renouvelables

Les déterminants du prix des énergies fossiles doivent faire l'objet d'une recherche approfondie. Le fonctionnement des divers marchés d'approvisionnement, *spot*, *forward* et de long terme, doivent être analysés avec une attention particulière, compte tenu de leur essor grandissant, comme l'élasticité - prix de l'offre et de la demande.

- régulation des différents marchés énergétiques

Dans le contexte de la raréfaction des énergies fossiles, de la lutte contre le changement climatique et de l'ouverture des marchés, il est primordial de procéder à une analyse comparée des diverses politiques publiques de régulation, de manière à mesurer leurs effets sur les prix de l'énergie, l'offre,

la demande et l'efficacité énergétique, ainsi que sur la sécurité d'approvisionnement.

- les réseaux de transport et de distribution de l'énergie ²³

L'opportunité du développement des différents réseaux, leur rentabilité ainsi que l'efficacité de leur mode de gestion doivent être évaluées. L'état des interconnexions transfrontalières des réseaux de transport et de distribution du gaz et de l'électricité doit faire l'objet d'une analyse approfondie, sachant que leur développement est nécessaire à la mise en place d'une concurrence effective entre les différents producteurs européens. Il permet notamment le lissage du coût de l'électricité en période de pointe et prévient un recours trop intensif aux centrales thermiques à flamme. Les recherches visent à adapter les réseaux électriques et leurs outils de gestion à une part de plus en plus importante de sources d'électricité décentralisées (éolien et à terme photovoltaïque) et assurer l'adéquation entre ces sources intermittentes et les usages.

5.5.1.1.3 Sécurité énergétique

- géopolitique de l'énergie

Les prix du gaz et du pétrole sont sensibles aux aléas des relations internationales et des crises géopolitiques. Les risques géopolitiques qui pèsent sur l'approvisionnement doivent être évalués. Leur incidence sur la volatilité et le niveau des prix doit être simulée.

La modélisation en équilibre général des effets macroéconomiques des chocs énergétiques doit être développée en tenant compte des effets de substitution qu'ils pourraient engendrer entre les ressources fossiles et les énergies renouvelables d'une part, et des effets revenus qu'ils exerceraient sur la demande, l'efficacité énergétique et la croissance.

- Quelle politique énergétique européenne ?

L'efficacité des politiques énergétiques menées en Europe doit être estimée à l'aune des grands bouleversements actuels. Au-delà de l'ouverture des marchés, du développement des réseaux transfrontaliers et de la lutte contre les positions dominantes, il faut s'interroger sur l'opportunité de la mise en place soit de politiques conjointes, soit d'une politique commune, notamment en matière de sécurité d'approvisionnement, d'indépendance énergétique et de promotion des énergies renouvelables.

5.5.1.1.4 Prospective énergétique

- L'évaluation de l'offre à moyen et long terme

La raréfaction des hydrocarbures et du gaz doit être évaluée de manière à anticiper ses effets sur leur prix et les effets de substitution entre les multiples sources énergétiques. La rentabilité des différentes filières de production doit être révisée en conséquence. Une attention particulière doit être consacrée à l'interaction existante entre le développement des énergies renouvelables et la facture énergétique à moyen et long terme.

- La prévision des besoins énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre

L'évolution des besoins énergétiques à l'horizon 2030 et 2050 doit être estimée sur la base de recherches approfondies tenant compte des évolutions démographiques et sociologiques, de la croissance économique potentielle, des progrès tendanciels des rendements des divers modes de production énergétique et des gains d'efficacité énergétique.

L'évaluation de ces besoins permettra de prévoir les émissions de gaz à effet de serre générées à moyen et long terme, en fonction de la composition du bouquet énergétique. Les résultats obtenus permettront d'orienter les politiques publiques de lutte contre le réchauffement climatique. Et d'élaborer divers scénarios type « facteur 4 », visant à diviser le montant des émissions de GES par quatre.

²³ Sur ce sujet, l'ADEME propose un programme de recherche sur les réseaux intelligents, dont les mécanismes de type "Demand Response" comportent une dimension économique importante.

5.5.1.1.5 *Les outils d'action économiques et non économiques des pouvoirs publics*

- Analyse comparée des politiques publiques

Dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique, il est indispensable d'étudier les coûts et l'efficacité relative des divers modes d'intervention étatiques, notamment :

- Les outils économiques régaliens : fiscalité, subventions, soutien à la recherche technologique... ;
- Les outils de marché : quotas et marchés de certificats ;
- Les outils non économiques : normalisation, labels, achats publics ... ;
- La combinaison et effet d'éviction des différents outils ;
- Modélisation macroéconomique des politiques publiques.

L'efficacité de ces outils devrait être appréciée en associant des modèles en équilibre général ECC (Equilibre Conjectural Cohérent) et des modèles sectoriels et technico-économiques. Cette démarche est la seule qui permette d'apprécier l'ensemble des effets directs et indirects de ces mesures sur la croissance économique et l'emploi. Une mesure fiscale aux effets récessifs immédiats peut indirectement avoir une incidence positive sur l'emploi si elle génère des économies d'énergies et le développement de nouveaux secteurs de production.

De ce point de vue, les effets d'entraînement en terme de croissance économique et d'emploi induits par les économies d'énergies, l'amélioration de l'efficacité énergétique ou le développement de la filière des énergies renouvelables, doivent faire l'objet d'une modélisation approfondie.

5.5.1.1.6 *Energies et collectivités territoriales*

La demande de modélisation et d'expertise se modifie et s'élargit avec les transformations institutionnelles en cours. Les grands opérateurs de l'énergie (EDF, GDF, Total...) ne sont plus seulement des fournisseurs d'énergies primaires mais aussi des pourvoyeurs de services énergétiques. A ce titre ils commencent à travailler avec les collectivités territoriales à des opérations intégrées de fourniture d'énergie et d'amélioration de l'efficacité énergétique. Les collectivités territoriales, en particulier les régions et les villes, demandent des moyens de concevoir des « plans énergétiques » locaux ou régionaux. Ces démarches commencent à se systématiser aux USA, en Chine, en Allemagne (Länder), en Suisse. Des normes méthodologiques seront indispensables pour que les efforts décentralisés puissent être comparés et évalués (exemple l'opération R2D2 Recherche pour le Développement Durable pour la région Ile de France).

5.5.1.2 Le potentiel de recherche existant

La recherche publique sur l'économie de l'énergie est souvent couplée avec les problématiques de changement climatique.

Parmi les principaux centres de recherche publics, figurent : IFP, IDDRI, Ecole des Mines de Paris, IFRI, Université Paris-Dauphine, Science-Po, CIRED, LEPII (Grenoble), CREDEN (Montpellier), Université de Toulouse, DELTA, ... Il faut souligner que les équipes de modélisation CNRS-Universités-Grandes Ecoles se sont maintenues les trente dernières années, au contraire de celles des grands opérateurs énergétiques (et des modèles macro-économiques de prévision). L'acquis de ces équipes constitue le socle de tout effort futur, mais il faut s'empresse de les sécuriser compte tenu de leur pyramide des âges. La plupart des chercheurs seniors ont entre 50 et soixante ans. Et les équipes ont survécu plus de 25 ans sans recrutement.

Les montants en jeu (valeurs annuelles actuelles) de la recherche en économie de l'énergie sont répartis de la manière suivante :

- ADEME : environ 2 M€ ;
- Observatoire de l'énergie : environ 0,7 M€ ;
- Les budgets spécifiques des grands organismes de recherche comme le CNRS, les Universités,

l'INRA, le CEA, l'IFP restent à évaluer.

Il existe des équipes de recherche en économie chez les grands opérateurs historiques de la distribution du gaz et de l'électricité, considérées comme une « école française » de la recherche sur l'économie de l'énergie, historiquement réputée au plus haut niveau mondial (tarification au coût marginal,...). Elles ont été naturellement redimensionnées par l'ouverture des marchés à la concurrence et les exigences du court terme. On peut évaluer à 10 M€ le montant annuel de recherche en économie de l'énergie à EDF (soit l'équivalent de 3,33 % du budget de la Direction de la Recherche). A titre de comparaison le budget annuel de Gaz de France est voisin de 6 M€ soit environ 8% de son budget de R&D.

Par ailleurs, on peut citer le conseil français de l'énergie (CFE), fondé par les grands énergéticiens français et l'Ademe, qui par l'intermédiaire de l'IFE sponsorisent une école française sur l'économie de l'énergie.

L'Association des Economistes de l'Energie regroupe des économistes universitaires, du secteur public et des grandes entreprises énergétiques.

La plupart des équipes françaises sont impliquées dans des programmes européens de recherche, sous l'égide de la DG Recherche, de la DG TREN ou de la DG Environnement : WETO, PRIMES, POLES, VLEEMS, ... Au niveau international ces équipes participent également à des travaux de l'AIE, ainsi que du Conseil Mondial de l'Energie : l'équipe du LEPII (modèle POLES) est responsable de l'exercice du Conseil Mondial de l'Energie, actuellement en cours, de prospective à l'horizon 2050. Le CIRED participe depuis le départ de manière active au Groupe 3 de l'IPCC qui est chargé de réaliser des synthèses sur l'économie des réponses au Changement Climatique. Il est également présent de manière régulière aux sessions de l'International Modelling Forum qui confronte les exercices de modélisation des principales équipes mondiales.

Par ailleurs, la recherche et l'analyse économique sur l'énergie font l'objet de nombreux travaux de consultants ou entreprises du secteur privé ou parapublic, tels que le Conseil Français de l'Energie, le CEREN (obtention des données de consommation : 4, 5 M€/an), Deloitte (Chaire Energie & Finance), Capgemini, etc.

5.5.1.3 La coordination des recherches

5.5.1.3.1 Les structures de financement des recherches en France

- Les Ministères (Observatoire de l'énergie, Equipement, Recherche, MEDD...);
- l'ADEME (soutien aux recherches, bourses de thèse);
- l'ANR;
- les opérateurs du domaine de l'énergie (CFE).

5.5.1.3.2 Les structures de financement en Europe

- le 7^{ème} PCRD (DG Recherche);
- Intelligent Energy for Europe (DG TREN).

5.5.1.3.3 Les structures de financement internationales

- L'AIE (40 Implementing Agreement sur des aspects techniques, mais comportant pratiquement tous des volets économiques), Le Conseil Mondial de l'Energie;
- Le Conseil Mondial de l'Energie WEC (World Energy Council).

Il manque toujours un outil permettant de connaître à la fois les ressources en données (statistiques techniques) détenus par les différents organismes et les rapports de recherches portant sur l'énergie réalisés par tous les contrats passés avec les organismes précédents. Il serait très utile d'imposer une sorte de « dépôt légal » des travaux sur l'énergie (non secrets évidemment). Les pratiques de dépôts et d'archivage « open source » en cours au CNRS pourraient servir d'inspiration.

5.5.1.4 Les propositions

- Fixer un objectif de financement de la recherche publique en économie de l'énergie en proportion de l'effort de recherche dans le domaine de l'énergie ;
- Renforcer la coordination et la valorisation des travaux, notamment sur la prospective énergétique, de façon à renforcer leur audience et leur propension à convaincre, dans un contexte national et européen ;
- Définir et mettre en place une stratégie concernant la recherche en économie de l'énergie au niveau européen : mieux utiliser les capacités d'orientation de la France, solliciter des équipes nationales sur les sujets clefs, susciter des accords de long terme entre équipes de haut niveau ;
- Etablir, sur chacun des questionnements de recherche identifiés plus haut, des modes spécifiques de collaboration recherche publique – recherche privée ;
- Renforcer la place de l'économie de l'énergie dans les enseignements et les chaires de Développement Durable qui se mettent en place dans les grands établissements d'enseignement. Augmenter le nombre de doctorants ;
- Mettre en place un dispositif interministériel de prévision et d'évaluation. La multiplication des exercices prospectifs menés par les divers ministères soulève de nombreux problèmes. Ces scénarios sont généralement commandés à des bureaux d'études, de façon irrégulière, ce qui ne facilite ni leur mise à jour rapide, ni leur exploitation à des fins d'évaluation. Enfin la réactualisation périodique d'exercices tels que le plan climat nécessite de disposer d'un modèle de prévision et d'évaluation. (la proposition consiste à créer ou identifier une structure opérationnelle publique capable de répondre aux besoins des différentes politiques publiques en matière de scénarios énergétiques et environnementaux).

5.5.2 Energie Société Environnement

La recherche en Sciences Humaines dans le secteur de l'énergie dépasse le domaine de l'économie. L'énergie occupe une place de première importance dans tous les aspects de la vie sociale (habitat, transports, santé, sécurité,...) si bien qu'elle est devenue un sujet incontournable des questions relatives au développement (mobilité, accès aux services essentiels...).

Les disciplines interpellées sont nombreuses : sociologie, démographie, droit, sciences politiques (gouvernance), voire même histoire et psychologie. Elles s'inscrivent dans le cadre général du développement durable des sociétés au Nord comme au Sud.

La ligne de partage entre les sciences humaines ainsi définies et l'économie au sens strict est en partie conventionnelle : la prospective économique de l'énergie à 40 ans doit prendre en compte les évolutions démographiques et sociologiques ; inversement, le comportement des particuliers quant à leur consommation d'énergie dépend évidemment du prix de celle-ci.

5.5.2.1 Les questionnements de recherche

5.5.2.1.1 Les impacts de la production et de la consommation d'énergie sur le développement durable

- Les effets environnementaux de la production énergétique

Le coût des externalités négatives de la production et de la consommation d'énergie sur l'environnement doit faire l'objet de recherches approfondies. Les pollutions de l'air, de l'eau, des sols, la production de déchets comme l'effet des émissions de GES sur le réchauffement climatique, doivent être pris en compte.

- La fourniture d'énergie et ses conséquences sociales dans les pays développés

Des études sociologiques doivent être réalisées sur les bénéficiaires de tarifs spéciaux de solidarité du gaz et de l'électricité en France et sur l'efficacité du dispositif mis en place. Il serait opportun de

procéder à une analyse comparée de la mise en œuvre du service universel de l'énergie par les différents Etats européens.

- La fourniture d'énergie et ses incidences sur le développement des pays en voie de développement (PVD)

Des indicateurs quantitatifs et qualitatifs nationaux et internationaux relatifs à l'accès des différentes catégories de la population aux ressources énergétiques pourraient être établis. Une attention particulière devrait être portée sur le mode et l'ampleur de la diffusion des innovations technologiques, et ses effets d'entraînement économiques et sociaux.

Une recherche spécifique sur les pays en développement en croissance rapide est indispensable (Chine, Inde, Brésil...). Les problèmes de l'économie informelle d'un côté, l'émergence de solutions techniques nouvelles (comme des mini réseaux de distribution d'électricité avec une généralisation de technique à haute efficacité énergétique dans l'éclairage, les bâtiments ou les transports ...) doit être envisagée. Des équipes de sciences humaines du CNRS (en géographie notamment) sont susceptibles de se positionner sur ces thèmes.

- Les effets d'entraînement économique du secteur énergétique

Des recherches complémentaires devraient être menées sur l'évolution de la contribution du secteur énergétique à la croissance économique et aux créations d'emploi, notamment le secteur des énergies renouvelables. Des études prospectives relatives à la dépendance de l'économie aux divers types de ressources énergétiques devraient être menées.

5.5.2.1.2 *Les déterminants de la demande sociale d'énergie*

- La croissance économique

Les corrélations existantes entre la croissance économique, l'internationalisation des échanges, l'évolution de la part relative des biens et services dans le PIB et l'évolution induite des modes de production, ainsi que leurs incidences sur la variation de la demande énergétique, doivent être mieux compris si l'on souhaite réaliser des études prospectives fiables dans le cadre de la mondialisation.

- Les politiques d'urbanisme et de transport

Les politiques de transport, de déplacement urbain, les plans d'occupation des sols, les modes d'aménagements du territoire... ont des incidences importantes sur la demande énergétique. Elles doivent faire l'objet de recherche approfondie.

- Intégration de l'environnement

Dans une logique d'intégration de l'environnement dans la politique énergétique, les économistes de l'environnement ont développé le modèle DPSIR (*Driving forces-éléments moteurs / Pression / State – Etat / Impacts / Response*) qui permet de structurer l'information environnementale. En articulant l'analyse du risque, l'évaluation des dommages et la décision politique, le schéma permet de concevoir des indicateurs (synthétiques, de diagnostic et de suivi) et aussi d'alimenter l'évaluation coûts-avantages des politiques.

5.5.2.1.3 *Les représentations sociales*

Les attitudes et comportements des ménages quant aux consommations d'énergie

- Les pratiques des particuliers

L'évolution du mode de vie des ménages a une influence conséquente sur la consommation domestique d'énergie, notamment leur mode de transport, d'habitat, de chauffage, d'éclairage... Leurs pratiques quotidiennes ont un effet significatif sur la demande énergétique. Elles peuvent être plus ou moins déterminées par des normes sociétales dites « citoyennes », visant à promouvoir la sobriété énergétique, ou des normes consuméristes énergivores selon les cas. Elles doivent être étudiées avec attention de manière :

- à modéliser de façon pertinente l'évolution de la demande énergétique future
- à mieux cibler les plans de communication sur les économies d'énergies et de sensibilisation sur les pratiques les plus énergivores.
- à adapter en conséquence les politiques publiques.
- Les effets des variables démographiques et sociologiques

Les évolutions démographiques et le mode d'organisation familiale ont des incidences sur les besoins énergétiques. A titre d'exemple, on peut faire valoir que le vieillissement de la population n'est pas sans incidence sur les dépenses de chauffage ou les modes de déplacements. L'absence de cohabitation entre générations, la fréquence des séparations conjugales... ont tendance à augmenter le nombre de m² par habitant, diminuer le nombre de passagers par véhicules et donc la consommation énergétique par tête. Elles doivent faire l'objet d'études approfondies.

Les dépenses énergétiques des individus sont également déterminées en fonction de critères sociologiques. Ceux-ci doivent être mieux identifiés.

5.5.2.1.4 *L'implémentation des technologies à forte efficacité énergétiques*

Dans un premier temps deux secteurs cruciaux doivent faire l'objet d'une évolution vers la forte efficacité énergétique, le bâtiments et les transports. Pour ce qui concerne le bâtiment, le grand chantier de la rénovation énergétique fait l'unanimité. Il implique cependant une bonne coordination de l'ensemble des acteurs relais depuis les producteurs de matériaux et de composants jusqu'aux professions du bâtiment chargé de la mise en œuvre. La coordination de cette nouvelle filière de rénovation du bâtiment implique de nombreuses études sur les modalités de définition des projets, de leur conduite, de leur certification. De la même manière les transformations des rapports entre les différentes modalités des transports va impliquer de nouvelles formes institutionnelles, de nouvelles technologies dont l'agencement fait encore problème (économie des fonctionnalités, Cybercars de l'INRIA...).

5.5.2.1.5 *Les processus de concertation et les modes de gouvernance*

- Le mode d'élaboration des politiques publiques

La construction des compromis sociaux autour des équipements de production d'énergie, de transport doit faire l'objet de recherches spécifiques, à tous les niveaux de régulation: régional, national, européen, mondial.

- L'application du principe de précaution

Les problèmes énergétiques sont généralement d'une grande complexité technique. Leur résolution comme leurs conséquences économiques et écologiques dépassent l'horizon temporel des décideurs politiques. Dans ce cadre, l'application du principe de précaution pose des problèmes particuliers de gouvernance qui méritent d'être étudiés à l'intersection des débats scientifiques et des débats publics et politiques

5.5.2.2 Le potentiel de recherche existant

Plusieurs organismes disposent de petites équipes de recherche travaillant dans le domaine des sciences humaines sur la problématique de l'énergie : EDF (GRETS), le CEA, l'INRA, l'INRETS et l'IFP. L'ADEME a créé depuis ces dernières années un réseau informel de chercheurs en sciences humaines dans le domaine de l'énergie, appartenant à des laboratoires plus « généralistes » : LATTS, LET, etc. ... Pour le bâtiment, le CSTB possède un potentiel en socio-économie, pour les transports ne pas oublier les équipes liées à la RATP, SNCF. Sur les technologies à haute efficacité énergétiques des travaux sont en cours au CERTOP et à l'IFU (tous deux CNRS). Des potentiels devraient se dégager aussi à l'EHESS. Sur les impacts environnementaux des production d'énergie, des équipes liées au Département Environnement et Développement Durable du CNRS sont intéressé par les questions liées aux productions de biocarburants..

A l'instar du champ économique, plusieurs de ces équipes sont impliquées dans des programmes

européens : domaines socio-économiques de certains ERANET (DG Recherche), comme CIRCLE sur l'adaptation au changement climatique, programme BEHAVE sur les comportements des consommateurs face à l'énergie (DG TREN).

5.5.2.3 La coordination des recherches

Actuellement, les équipes de recherche, en dehors du strict champ économique, sont dispersées et relativement peu nombreuses au regard du nombre de laboratoires existants en sciences économiques. Récemment, le programme français Gestion et Impacts des Changements Climatiques (MEDD) a financé plusieurs projets en sciences humaines.

La coordination au niveau européen, toujours en dehors du strict champ économique, est encore émergente. L'aboutissement des premiers ERANET, fin 2007, devrait déboucher sur des appels d'offres européens plus structurés.

5.5.2.4 Les propositions

- favoriser l'interdisciplinarité et coordonner les recherches en économie de l'énergie et celles en sciences humaines.
- Promouvoir, au niveau français et européen, des programmes dédiés aux problématiques référencées ci-dessus, en les dotant de budgets significatifs.
- Mobiliser les équipes de recherche dans les disciplines de la sociologie et des sciences politiques, en privilégiant une meilleure compréhension des comportements, en particulier les freins au changement vis-à-vis de la réduction des consommations et l'analyse des coûts et de leur perception au niveau du consommateur.
- Promouvoir également les recherches concernant les jeux d'acteurs, opérateurs énergétiques, économiques et politiques, institutionnels et associatifs.

5.5.3 Soutien et analyse de l'innovation

Les innovations en matière d'efficacité ou de rendement énergétiques ont pris une importance économique et écologique considérable. Elles sont susceptibles d'endiguer les effets inflationnistes de la raréfaction des énergies fossiles et le coût du changement climatique. Elles peuvent réduire l'insécurité qui pèse sur les approvisionnements en énergies fossiles en améliorant l'indépendance énergétique. Elles confèrent un avantage économique aux entreprises qui peut s'avérer crucial dans le cadre de la concurrence internationale exacerbée qu'elles se livrent. Dans ce nouveau contexte, il est devenu impératif de raccourcir les délais de maturation des technologies et d'anticiper l'adoption des nouvelles normes.

Ainsi de nouvelles questions se posent : comment doivent évoluer les systèmes nationaux d'innovation pour s'adapter aux nouvelles conditions définies par la mondialisation des connaissances et la rapidité de diffusion du progrès technique ? Quelles sont les interactions entre les politiques d'innovation et les politiques de régulation de la concurrence ? Quelles sont les conditions d'une transition réussie en accord avec l'évolution des comportements et de la demande ?

5.5.3.1 Les questionnements pour la recherche

5.5.3.1.1 Innovation énergétique, économie internationale, économie du développement

- Innovation énergétique et compétitivité internationale

Les travaux de recherche en devraient être menés sur l'impact de l'ouverture des marchés européens de l'énergie sur le niveau et la nature des activités de RDI des firmes et d'apprécier les effets des règles d'encadrement de la concurrence sur les stratégies d'acteurs (ex : collusion, coalition, stratégie de prix ou de services) dans le domaine de l'innovation énergétique. Il est donc nécessaire d'améliorer la qualité des statistiques d'investissement dans la recherche – développement en matière d'innovation

énergétique, leur comparabilité internationale, ainsi que les données relatives aux performances et aux coûts des différentes innovations technologiques.

Il convient de mesurer et de simuler les effets induits en terme de compétitivité - prix, directs et indirects, des innovations relatives à la réalisation des économies d'énergie et à l'amélioration des rendements des différents modes de production énergétique.

- Innovation et protection de l'environnement

Il faudrait mieux apprécier les effets des transferts de technologies énergétiques sur les performances environnementales du pays d'accueil, ainsi que l'impact des accords commerciaux sur l'innovation et la diffusion mondiale des meilleures technologies de production et d'utilisation d'énergie.

5.5.3.1.2 Innovation, politique publique et diffusion des connaissances

- Le bien-fondé des politiques publiques de soutien à l'innovation

Historiquement, une partie importante des travaux en « socio-économie de l'innovation » s'est intéressé à la justification du rôle de l'Etat dans le domaine de l'innovation. Elle repose sur quatre arguments : l'importance et la nécessaire mutualisation du risque de l'innovation énergétique, l'existence d'externalités positives, l'horizon temporel particulièrement long du processus d'innovation énergétique, et l'existence « d'effets stratégiques » pour le bien-être futur de la Collectivité.

- Les mesures publiques d'incitation à innover

Les effets des différents systèmes de promotion des EnR et des NTE (ex : tarif de rachat, certificats verts) sur l'innovation (crédits d'impôt ou interventions ciblées, Fondations de recherche...) doivent faire l'objet d'une évaluation. Il convient également de définir quels sont les outils d'optimisation du partage des bénéfices de l'innovation lors des coopérations publiques privées.

- Le rôle des politiques publiques dans la diffusion des connaissances

Toutes les modalités d'organisation de nos sociétés n'ont pas la même capacité à diffuser rapidement des connaissances utilisables pour faire émerger de nouvelles idées, de nouveaux produits ou procédés. Face au rôle central que l'innovation joue dans la capacité des pays à entrer dans une économie de la connaissance et à répondre par le haut aux enjeux énergétiques et environnementaux, il est essentiel de hiérarchiser les différentes modalités d'organisation de nos sociétés en fonction de leur capacité à diffuser des connaissances, d'en étudier la genèse et d'identifier les leviers permettant de créer pas à pas ces organisations.

5.5.3.1.3 Sociologie de l'innovation, acteurs et services énergétiques

L'analyse de la diffusion des innovations au sein des différentes catégories de consommateurs d'énergie et de services énergétiques est nécessaire pour mieux apprécier non seulement leurs rôles dans les systèmes d'innovation nationaux mais aussi pour aider les entreprises à concevoir des services énergétiques accélérant le rythme de diffusion des innovations de produit, de procédé et de service en matière énergétique.

Dans ce cadre, il serait opportun de mener des travaux pour :

- analyser les déterminants de l'appropriation sociale des innovations dans le domaine de l'énergie,
- étudier le rôle des consommateurs dans leur capacité à faire émerger des innovations en matière d'utilisation efficace et moins polluante de l'énergie,
- réaliser des « cartographies d'acteurs » en fonction de leur comportement vis-à-vis de l'innovation énergétique afin d'identifier les « conservateurs » et les « anticipateurs » et de proposer des formes de service énergétique adaptées à chacune de ces catégories d'acteurs.

5.5.3.1.4 Secteurs clés et Impacts

Le secteur clé visé est celui des systèmes énergétiques avec une application au cas de la production, du transport et de l'utilisation d'énergie. Le choix des systèmes énergétiques s'explique par la volonté de donner, à l'intérieur de la thématique énergie, un caractère résolument transversal aux travaux en matière de « socio-économie de l'innovation ».

En effet, l'évolution des systèmes énergétiques (ex : plus ou moins grandes décentralisation, réseaux intelligents, interactivité, émergence de nouveaux services énergétiques) délimitera fortement la nature et l'efficacité du mix énergétique dans les 50 années à venir. Or, dans la nouvelle architecture des programmes de R&D en lien avec l'énergie (ex : PAN-H, PREDIT, PREBAT, photovoltaïque) les systèmes énergétiques ne font l'objet d'aucun programme leur étant clairement dédiés, ce qui n'est pas en accord avec les enjeux qu'ils représentent.

Cette proposition n'est qu'indicative et s'appuie sur l'hypothèse que l'ensemble des sujets de recherche actuellement couverts par les différents programmes de R&D consacrés en tout ou partie à l'énergie soient maintenus dans les années qui arrivent.

5.5.3.2 Le potentiel de recherche existant

5.5.3.2.1 Les acteurs nationaux

Les acteurs nationaux travaillant dans les domaines de la « socio-économie de l'innovation » recensés dans le tableau ci dessous regroupent non seulement des acteurs qui mènent déjà des travaux en matière de « socio-économie de l'innovation » appliqués au domaine de l'énergie, mais aussi des équipes qui maîtrisent des techniques ou des corpus de connaissance qui n'ont pas encore été spécifiquement appliqués à l'énergie, mais qui pourraient permettre de répondre à tout ou partie des priorités de R&D qui ont été formulées. Ce tableau n'est pas exhaustif.

Tableau 29 - Equipes nationales travaillant en « socio-économie de l'innovation »

Questions de recherche	Equipes de recherche	Commentaires
Commerce international, économie du développement et de la transition	CERDI, DELTA, ARQADE	Pas de spécialités énergétiques mais maîtrise d'approches qui pourraient être appliquées à l'énergie
Economie industrielle et de la concurrence	CREDEN, CERNA, IDEI, BETA	Spécialisé dans l'énergie ou menant des travaux sur l'énergie
	CREST – ENSAE	Pas de spécialités énergétiques mais maîtrise d'approches qui pourraient être appliquées à l'énergie
Economie publique	GREQUAM, GREMAQ,	Pas de spécialités énergétiques mais maîtrise d'approche qui pourraient être appliqués à l'énergie
	IDEI, CREDEN, CIREN, LEPI	Mène des travaux dans le domaine de l'énergie
Sociologie de l'innovation	CSI,	Mène des travaux dans le domaine de l'énergie
	IMRI, LATTS CREUSET – Université de St Etienne	Pas de spécialités énergétiques mais maîtrise d'approches qui pourraient être appliquées à l'énergie

Observation et construction de bases de données	CREST-ENSAI	Pas de spécialités énergétiques mais maîtrise d'approche qui pourraient être appliquées à l'énergie
	Enerdata	Spécialisé dans l'énergie
Prospective stratégique	LIPSOR, IMRI	Pas de spécialités énergétiques mais maîtrise d'approches qui pourraient être appliquées à l'énergie
Théorie des organisations et analyse des réseaux d'innovation	CSI	Mène des travaux dans le domaine de l'énergie
	IMRI, LATTS, CREUSET – Université de St Etienne	Pas de spécialités énergétiques mais maîtrise d'approches qui pourraient être appliquées à l'énergie

5.5.3.3 La coordination des recherches

- La DGEMP et l'observatoire de l'énergie (statistiques et indicateurs d'efforts de R&D dans le domaine de l'énergie),
- La D4E du MEDD,
- DGRI A6 Département Sciences de l'Homme et de la Société,
- L'ADEME (analyse des comportements et orientation de l'innovation) et l'ensemble de ses partenaires,
- La Commission Européenne (outils de soutien à l'innovation, statistiques R&D).

A l'échelle européenne, les partenariats déjà engagés s'inscrivent soit dans le cadre des projets financés par le 6^{ème} PCRD (ex : le projet SRS NET EEE dont l'un des objectifs est d'améliorer la qualité des données communautaires retraçant les dépenses de R&D dans le domaine de l'énergie), soit dans le cadre d'initiatives de la Commission engagées pour structurer l'espace européen de la recherche. On citera à titre d'exemple, les nombreuses plate formes technologiques traitant du domaine de l'énergie (ex : réseaux énergétiques, hydrogène et pile à combustible, chimie durable, biocarburants) et les ERANET qui pour un certain nombre d'entre eux portent sur des thématiques en lien avec une partie du champ couvert par la « socio-économie de l'innovation » appliqué au domaine de l'énergie (ex : INNER)

- OCDE / AIE (gouvernance de la recherche, effets macro-économiques de l'innovation, politique de la concurrence et innovation).

En 2002, l'OCDE a lancé le projet MONIT (Monitoring and Implementing National Innovation Policies) dont l'un des objectifs est d'analyser les politiques et systèmes nationaux d'innovation pour en extraire des bonnes pratiques au regard des nouveaux enjeux auxquels les politiques d'innovation doivent faire face (ex : mondialisation, complexification des enjeux, mouvement de décentralisation dans de nombreux pays, interaction de plus en plus forte avec d'autres secteurs).

Dans ce cadre, certaines études pratiques portant sur une comparaison des systèmes d'innovation dans les domaines des piles à combustibles et de l'extraction pétrolière ont déjà été réalisées. La France avait participé à ces travaux en répondant aux questionnaires qui ont servi de base à la réalisation de ces études. Sachant que l'innovation et l'énergie sont deux thématiques auxquelles l'OCDE - AIE accordent une importance toute particulière, il est clair que les résultats de projet de recherche en matière de « socio-économie de l'innovation » pourraient servir de base à de nombreux partenariats au sein de l'OCDE.

5.5.3.4 Les propositions

- Améliorer l'insertion des équipes françaises dans les programmes de recherche communautaires consacrés à l'analyse des dynamiques de l'innovation ;
- Inciter les équipes de recherche en sciences sociales à traiter des questions d'innovation énergétique afin de compléter les approches à dominante technique de l'innovation;
- Encourager la réalisation d'études de cas sur des exemples d'actions françaises mises en place pour accélérer le rythme de l'innovation dans les domaines de l'énergie;
- Favoriser l'émergence d'espaces d'échange et de débat entre les spécialistes des sciences humaines de l'innovation et des décideurs (ex : politiques, dirigeants d'entreprises innovantes) pour les faire bénéficier d'analyses issues des derniers résultats de la recherche.

Les pouvoirs publics soutiennent de longue date et de manière déterminée la recherche dans le domaine énergétique. Historiquement, l'un des principaux domaines d'investissement a été celui de l'énergie nucléaire avec la création du Commissariat à l'énergie atomique au sortir de la guerre. Pour autant, les thématiques de recherche se sont peu à peu diversifiées. Au cours des années 1960, avec la création de la délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST) voient le jour les actions concertées destinées à rapprocher recherche publique et recherche industrielle. Cela conduit de fait à de nouvelles modalités de développement de la recherche énergétique, diversifiant les approches par rapport à celles promues par les seuls grands organismes de recherche spécialisés. Une nouvelle étape correspond à l'émergence au sein du CNRS de programmes spécifiquement dédiés à l'énergie à partir des années 1970. La création de l'ADEME au début des années quatre-vingt-dix a entraîné l'émergence dans le paysage d'un nouvel acteur, jouant un rôle original d'agence de programme, rôle aujourd'hui complété sous des formes variées par les interventions de l'Agence nationale de la recherche (ANR) et de l'Agence pour l'innovation industrielle (AII) qui s'intéressent toutes deux aux thématiques énergétiques. Ainsi s'est progressivement constituée une palette d'outils au service de la recherche énergétique. Cette diversification reflétait l'évolution d'une politique énergétique désormais plus soucieuse de constituer un bouquet énergétique diversifié.

Les efforts conduits au fil des années antérieures ont conduit à doter la recherche française d'atouts importants :

- l'existence d'une recherche académique solide à même de servir de base aux développements technologiques ;
- la présence d'organismes spécialisés mêlant recherche fondamentale et finalisée, pourvus d'une culture du développement technologique et sensibles aux problématiques industrielles ;
- le développement de groupes industriels à même de relayer les innovations apportées par la recherche ;
- des positions reconnues au plan international dans les domaines comme le nucléaire, les produits pétroliers et gaziers, l'hydrogène ou la biomasse.

Pour autant, des progrès demeurent à accomplir dans divers domaines :

- la recherche française est demeurée longtemps concentrée sur un petit nombre de thématiques liées à l'existence d'organismes spécialisées. Cela a pu conduire à négliger certains champs de recherche aujourd'hui considérés comme prometteurs ;
- la question du passage de l'idée scientifique à la réalisation industrielle de série demeure posée. Une culture du développement et de la réalisation de pilotes technologiques doit encore être promue ;
- le cloisonnement entre structures et la dispersion des moyens dans plusieurs secteurs, apparaissent encore parfois préjudiciable et appelleraient un effort accru pour promouvoir des projets prenant en compte l'ensemble du continuum de la recherche scientifique et technologique ;
- l'implication de l'industrie demeure encore timide pour des recherches dont l'horizon d'aboutissement est nécessairement lointain, mais commande la maîtrise future des marchés de l'énergie,
- les PME peuvent jouer un rôle très important dans la diffusion des bonnes pratiques et des technologies, notamment lorsqu'il s'agit de s'intéresser à la consommation diffuse de l'énergie dans le bâtiment et les transports, voire à celles de leur process ;
- une articulation renforcée avec les recherches européennes ou internationales mériterait d'être soutenue.

6.1 Les agences

6.1.1 l' Agence de l'Innovation Industrielle : AII

Créée en août 2005 sous forme d'un EPIC, l' Agence de l'Innovation Industrielle a pour mission de susciter, identifier et sélectionner des programmes mobilisateurs pour l'innovation industrielle (PMII), participer à leur financement et procéder au contrôle et à l'évaluation périodique de ces programmes. Elle mobilise les compétences publiques et privées capables de construire des programmes adaptés à la diversité des champs d'innovation industrielle. Elle contribue à créer des partenariats, organisés autour de grandes entreprises ou d'entreprises de taille moyenne, capables d'atteindre une dimension mondiale. L'AII inscrit son action dans un cadre européen et encourage les coopérations transfrontalières.

Dans les domaines d'action retenus par l'AII figurent l'énergie et l'environnement, les transports et le bâtiment.

En 2006 cinq PMII ont été retenus, qui concernent les nouvelles technologies de l'énergie et la maîtrise de l'énergie :

- HOMES, le bâtiment économe en énergie ;
- BioHub, valorisation des ressources agricoles par les biotechnologies ;
- NeoVal, le système de transport modulaire automatique sur pneus ;
- VHD véhicule hybride diesel électrique ;
- Osiris dont la production de bioéthanol est un des produits finaux.

Pour ces cinq programmes le montant de l'aide accordée serait de 240 M€ dont 125 M€ en subvention.

6.1.2 Agence Nationale de la Recherche : ANR

Le groupement d'intérêt public Agence Nationale de la Recherche - GIP ANR – créé le 7 février 2005 est une agence de financement de projets de recherche. Son objectif est d'accroître le nombre de projets de recherche, venant de toute la communauté scientifique, financés après mise en concurrence et évaluation par les pairs.

L'ANR s'adresse à la fois aux établissements publics de recherche et aux entreprises avec une double mission : produire de nouvelles connaissances et favoriser les interactions entre laboratoires publics et laboratoires d'entreprise en développant les partenariats.

La sélection des projets retenus dans le cadre d'appels à projets (AAP) est effectuée sur des critères de qualité pour l'aspect scientifique auxquels s'ajoute la pertinence économique pour les entreprises.

L'ANR est devenue au 1^{er} janvier 2007 un Etablissement Public à caractère Administratif (EPA).

L' ANR a bénéficié, pour l'année 2006, d'une capacité d'engagement de 800 millions d'euros (700M€ en 2005) pour des projets de recherche d'une durée maximale de quatre ans. 42 appels à projets (35 en 2005) et 4 ERANET ont été lancés en 2006.

L'ANR est structurée en départements Il y a cinq départements thématiques et deux départements transversaux (le département « programme blanc » et le département « partenariat et compétitivité »).

Parmi les cinq départements scientifiques celui dédié à « l'énergie durable et environnement » lance des appels à projets qui s'inscrivent dans une politique d'engagements de la France dans le domaine de l'énergie.

Ce département a organisé ses programmes de manière à répondre à trois axes stratégiques :

- Le développement de procédés énergétiques alternatifs aux énergies fossiles ;
- La sobriété en matière d'équipement, de transports et d'aménagements ;
- La réduction des émissions polluantes.

Une douzaine d'appels à projets (AAP) concernant directement les énergies renouvelables a été lancé en 2005 et 2006 dont voici le détail thématique, financier et chronologique:

Tableau 30- Aides accordées dans les différents AAP en engagement budgétaire

Programmes	2005 (en M€)	2006 (en M€)
Procédés énergétiques propres	47,8	46,6
PAN- H Hydrogène	29,6	28,9
Photovoltaïque	9,7	9,7
PNRB	8,5	8,0
Sobriété et Réduction des émissions	41,1	51,9
PREDIT - transports	17,1	21,3
PREBAT - bâtiments	2,7	4,5
PRECODD - écotecnologies	9,8	12,5
CO2	8,0	7,5
RGCU	3,5	6,2
Impact changement climatique	10,6	16,7
Vulnérabilités : milieux & climat		9,2
ECCO	3,3	
CATTEL	5,2	4,5
Programme Blanc	1,7	2,9
Jeunes chercheurs	0,4	0,1
Total	99,4	115,2

Un autre mode de soutien à partenariat entre la recherche et l'industrie se fait grâce aux instituts Carnot qui reçoivent de l'ANR un abondement financier calculé en fonction du volume de l'accroissement des contrats de recherche partenariale réalisés.

20 instituts ont été labellisés pour le premier appel à projet. Parmi ceux ci, 8 ont des activités qui ont un lien direct avec l'énergie.

Tableau – 31 recensement de ces instituts et les engagements budgétaires prévus par l'ANR.

Nom de l'institut Carnot	Abondement (en M€)
Arts et métiers	2.2
Energie et Propulsion	1
CSTB	1.9
IFP moteurs	3.7
Mines	4.6
BRGM	0.7
MIB Bordeaux	0.8
Total	14.9

6.1.3 Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie : Ademe

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle conjointe des ministères en charge de l'Ecologie et du

Développement durable, de l'Industrie et de la Recherche. Elle a pour missions de susciter, d'animer, de coordonner, de faciliter ou de réaliser des opérations ayant pour objet la protection de l'environnement et la maîtrise de l'énergie. Ses domaines d'intervention sont l'énergie, l'air, le bruit, les déchets, les sites et sols pollués et le management environnemental. C'est avant tout une agence d'objectifs.

Les programmes de recherche prioritaire de l'agence sont : le transport, le bâtiment, le photovoltaïque, le CO₂ et la biomasse.

Tableau 32- Aides accordées par l'Ademe en engagement budgétaire

Programmes ADEME (M€)	Montants engagés	
	2005	2006
Efficacité Energétique		
Technologie des transports (yc VPE)	15,3	19,3
Organisation des transports	1,7	2,4
Bâtiments, MDE et chaleur	3,5	3
Procédés industriels (yc agricole.)	4,4	3,7
Energie renouvelable		
Solaire thermique	0,5	0,8
Production électricité (PV, Eolien, hydro)	4,3	2,7
Usage thermique de la biomasse	0,2	0,7
biocarburants, biogaz, bio matériau	4,2	3
Géothermie	3,5	0,5
Actions transversales (études, thèses,...) sur énergie	4	4
Total	41,6	40,1

6.1.4 OSEO innovation

OSEO est né à l'initiative du gouvernement en 2005, pour favoriser la croissance des PME en assurant une plus grande continuité dans la chaîne du financement. Le groupe a été constitué par le rapprochement d'organismes ayant historiquement une mission d'intérêt général au service des TPE/PME, l'Anvar (Agence française de l'innovation) et la BDPME (banque du développement des PME) et de sa filiale SOFARIS, et du GIE Agence pour les PME. Ces organismes sont devenus respectivement OSEO innovation (anvar), OSEO financement, OSEO garantie (sofaris) et OSEO services (Agence pour les PME)

En appui des politiques nationales et régionales, OSEO finance et accompagne les PME dans les phases les plus décisives (création, innovation, développement, transmission) pour leur faciliter l'accès au financements des partenaires bancaires et organismes de fonds propres. OSEO couvre trois métiers:

- Le soutien à l'innovation par OSEO *innovation*
- Le financement des investissements et du cycle d'exploitation, en partenariat avec les établissements bancaires ; par OSEO *financement*
- La garantie des financements bancaires et des interventions en fonds propres ; par OSEO *garantie*

Par ailleurs, OSEO *services* publie des études (Observatoire des PME) et propose des services en ligne dédiés aux PME.

OSEO *innovation* soutient les projets d'innovation à composante technologique présentant des perspectives concrètes de commercialisation tant en France qu'à l'international. OSEO *innovation* accompagne et finance les entreprises qui ont une démarche d'innovation sur les marchés porteurs et nouveaux et ceci dans tous les secteurs. Le groupe OSEO offre aux entrepreneurs une large gamme de produits et services adaptés à toutes les phases du cycle de vie de l'entreprise mais le soutien aux

projets d'innovation se fait principalement sous forme de subventions et avances à taux zéro, remboursables en cas de succès ainsi que par des aides au recrutements de cadres pour la R&D.

Le soutien d'OSEO innovation au secteur de l'énergie se fait donc sur des projets déposés par des PME. Il n'y a pas d'appel à projets ce qui explique la diversité des thématiques soutenues. Les projets financés portent à la fois sur l'offre (la production) et l'utilisation de l'énergie :

- Pour la production d'énergie les projets concernent principalement l'exploration et la production des hydrocarbures, mais aussi le solaire photovoltaïque et thermique, l'éolien, l'hydraulique et l'énergie marine, la biomasse, le stockage de l'énergie, la production d'hydrogène et les PAC ;
- Pour l'utilisation de l'énergie les projets concernent l'amélioration de l'efficacité dans l'habitat, les transports et plus généralement dans les procédés industriels.

Tableau 33- aides accordées en 2005

Thèmes	Nombre de projets	Montant aide (M€)
Production d'énergie		
hydrocarbures(exploration – production)	19	4,65
solaire PV ou thermique	9	0,9
éolien	7	0,68
hydraulique et marine	4	0,37
biomasse	4	0,27
stockage de l'énergie	4	0,74
production H2 et PAC	2	0,39
outils marchés de l'énergie	2	0,24
Utilisation de l'énergie		
habitat	33	2,87
Industrie	15	3,28
transport	11	0,48
TOTAL	110	14,87

6.1.5 Fonds Unique Interministériel – Pôles de Compétitivité

Le FUI (logé au sein du Fonds de Compétitivité des Entreprises : FCE) est un instrument ciblé de soutien en faveur de la R&D industrielle, mis en œuvre prioritairement par le ministère de l'industrie associé aux autres ministères. Il vise à favoriser le dépassement de véritables verrous technologiques nécessitant une masse critique de R&D non accessible à un seul acteur et impliquant un partenariat fort entre entreprises de toutes tailles, laboratoires publics et organismes de formation. Il constitue l'un des outils majeurs d'appui aux projets des pôles de compétitivité et des Clusters Euréka (grands programmes stratégiques pluriannuels conçus et présentés par des industriels européens d'un secteur, labellisés et cofinancés par les gouvernements impliqués et entreprises parties prenantes au cluster).

Le FUI intervient, sous forme de subvention aux projets partenariaux, dans trois domaines :

- pour des projets de recherche et développement cruciaux, relevant du secteur industriel. Le FCE finance les partenaires français participant aux projets labellisés dans le cadre du programme européen Euréka ;
- pour les projets de recherche et développement dits « stratégiques », au titre desquels sont soutenues des opérations comme « NANO 2008 », spécifique à l'opération « Crolles II », dans le domaine de la microélectronique ;
- pour l'ensemble des projets de recherche et développement des 66 pôles de compétitivité

labellisés en 2005 et 2006, pour lesquels les engagements ont été de 42M€ en 2005 et de 195M€ en 2006.

Les pôles de compétitivité s'appuient sur la mobilisation, dans un espace géographique limité, d'entreprises de toutes tailles, d'unités de recherche et de centres de formation, engagés dans des projets coopératifs innovants, et présentant une visibilité internationale. Les pôles de compétitivité doivent permettre de contribuer à attirer de nouveaux partenaires, à favoriser l'emploi et conforter les territoires. Ils ont vocation à mobiliser les politiques d'intervention de l'Etat et des acteurs publics territoriaux en matière industrielle mais aussi de recherche. Ils ont un effet structurant, en concentrant dans la durée l'affectation des moyens publics, humains et matériels. Les pôles de compétitivité sont ainsi rendus plus attractifs en vue des choix de localisation des acteurs concernés. Ils dessinent une nouvelle carte des activités à fort contenu technologique.

Les thématiques énergétiques occupent une place prépondérante au sein des pôles à trois niveaux au moins :

- En tant qu'objectif :

5 pôles sont principalement positionnés sur ces thématiques : « TENERDIS » (Technologies de Energies renouvelables), en Rhône-Alpes, « SSEE » (sciences et systèmes de l'énergie électrique en Centre), « CAPENERGIES » en Provence-Alpes-Côte-d'Azur (énergies non émettrices de gaz à effet de serre), « DERBI » (Développement des énergies renouvelables dans le bâtiment et l'industrie) en Languedoc-Roussillon et pour l'énergie nucléaire, le « Pôle Nucléaire de Bourgogne » et le pôle « TRIMATEC » (transfert de technologie du nucléaire vers tous les autres secteurs industriels).

- En tant que thème stratégique :

de nombreux pôles comptent l'énergie parmi leurs thèmes stratégiques dominants, tels que le pôle MINALOGIC (microélectronique), en Rhône-Alpes, « Industries et Agro ressources » en Picardie Champagne-Ardenne, ou encore les pôles transport et chimie,

- En tant que préoccupation :

dans de nombreux projets des autres pôles enfin, les préoccupations de nature énergétique transparaissent de manière assez nette, ce qui atteste de la dimension transverse des technologies de l'énergie.

Le tableau suivant, fait apparaître l'importance des thématiques énergétiques et environnementales dans les projets retenus dans le cadre des deux premiers appels d'offres (2006) « pôles de compétitivité » :

Tableau 34 – Aide du FUI pour les pôles de compétitivité

	Total des projets soutenus par le FUI	Total des projets incluant une thématique énergie / environnement	Dont projets se Positionnant uniquement sur la thématique énergie/environ ^t
Nombre de projets retenus	149	37	dont 18
Assiette financière retenue	1 030 M€	146 M€	dont 66 M€
Aides publiques accordées	307 M€	54 M€	dont 26 M€
Dont FUI	196 M€	37 M€	dont 17 M€

Les 18 projets énergie / environnement retenus concernent principalement, pour les projets énergie : l'énergie dans le bâtiment et l'industrie (avec la maîtrise de la demande, les économies d'énergie et l'évolution vers des process moins énergivores), la traction ferroviaire, l'aéronautique et la gestion des

réseaux électriques.

6.1.6 Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières (RTPG)

Les projets financés par le RTPG s'intègrent dans les priorités de recherche définies dans le plan stratégique du Comité d'études pétrolières et marines (CEP&M). Ainsi, les thématiques suivantes bénéficient en priorité des engagements financiers accordés dans le cadre du réseau :

- développement des champs satellites et marginaux en mer ;
- exploitation des champs situés en offshore très profond (plus de 3 000 m de fond) ;
- amélioration de l'imagerie sismique dans les zones plissées et les zones sous écran (piémonts, dômes de sel...) ;
- production des hydrocarbures non conventionnels (huiles lourdes) ;
- traitement des gaz acides (CO₂, H₂S...) associés aux champs d'hydrocarbures ;
- « monitoring » des champs et re-développement des champs matures ;
- maintien de la veine fluide en exploitation offshore ;
- exploitation des réservoirs très enfouis ;
- conception d'infrastructures pour l'exploitation du GNL.

En 2005, 15,7 M€ d'aides, sous forme d'avances remboursables, ont été accordées par ce réseau.

6.2 Organismes réalisant la R&D

6.2.1 IFP

L'IFP est un organisme public de recherche et de formation (il relève de la catégorie des EPIC, Etablissement à Caractère Industriel et Commercial), à l'expertise internationalement reconnue, dont la mission est de développer les énergies du transport du XXI^e siècle. Il apporte aux acteurs publics et à l'industrie des solutions innovantes pour une transition maîtrisée vers les énergies et matériaux de demain, plus performants, plus économiques, plus propres et durables.

L'IFP assure le transfert entre recherche fondamentale, recherche appliquée et développement industriel. Son financement est assuré à la fois par le budget de l'État et par des ressources propres, provenant de partenaires privés français et étrangers.

L'IFP emploie 1800 collaborateurs (plus de cinquante métiers différents) et possède deux établissements en France, à Rueil-Malmaison et à Lyon.

Pour remplir sa mission, l'IFP poursuit 5 objectifs stratégiques complémentaires :

- Repousser les limites du possible dans l'exploration et la production du pétrole et du gaz : parce que l'exploration des hydrocarbures s'est faite jusqu'alors sur les sites les plus faciles d'accès, l'IFP développe des technologies qui permettront d'accéder à des hydrocarbures localisés plus loin, plus profondément, plus efficacement et plus longtemps.
- Transformer le maximum de matière première en énergie du transport : à partir d'un savoir-faire reconnu en procédés propres de raffinage et pétrochimie, l'IFP développe les technologies qui permettent de produire davantage de carburants et de matériaux de synthèse respectueux de l'environnement.
- Développer des véhicules propres et économes en carburant : fort de son expérience en motorisation, acquise en partenariat avec les plus grands constructeurs automobiles, l'IFP conçoit et finalise les solutions technologiques pour réduire la consommation des véhicules et limiter au

maximum leur impact sur l'environnement.

- Diversifier les sources de carburants : pour limiter la dépendance du secteur des transports au pétrole, l'IFP travaille sur la transformation de la biomasse, du gaz et du charbon pour mettre au point les carburants de demain, tels les biocarburants, et étudie les solutions à plus long terme comme l'hydrogène.
- Capturer et stocker le CO₂ pour lutter contre l'effet de serre : parce que les émissions de CO₂ sont principalement liées à l'utilisation d'énergie, il est indispensable, au-delà de l'effort pour les réduire, de capter le CO₂ là où c'est possible, c'est-à-dire principalement sur les sites industriels. L'IFP développe les procédés de captage, transport et stockage dans le sous-sol qui permettront d'éviter tout rejet dans l'air.

Partie intégrante de l'IFP, l'École Nationale du Pétrole et des Moteurs (ENSPM) propose, en réponse aux besoins des industriels, des formations complémentaires de troisième cycle à de jeunes ingénieurs. Chaque année, elle délivre plus de 500 diplômes à des étudiants issus du monde entier.

Enfin, l'IFP est un acteur majeur du développement industriel et de la valorisation industrielle des résultats de ses recherches (plus de 12 000 brevets) en soutenant la création d'une trentaine d'entreprises devenues fortement créatrices d'emplois et exportatrices. Au cœur de la politique de transfert des innovations vers le marché, ces entreprises opèrent dans l'ensemble des domaines de recherche couverts par l'IFP : aussi bien dans la recherche pétrolière, le conseil et l'ingénierie, en passant par la fourniture de produits, d'équipements et de services, que dans les nouvelles technologies de l'énergie (NTE).

6.2.2 CEA

Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) est un établissement public à caractère scientifique, technique et industriel qui relève sur le plan juridique de la catégorie des EPIC (Etablissement à Caractère Industriel et Commercial)²⁴.

Le CEA est un organisme français majeur en matière de recherche, de développement et d'innovation qui intervient principalement dans trois grands domaines d'activité : l'énergie, les technologies pour l'information et la santé, ainsi que la défense (conception, fabrication et entretien des têtes nucléaires destinées aux armées et maintien d'une capacité de dissuasion nucléaire).

L'activité de l'établissement fait appel à la recherche fondamentale et appliquée qui se répartit entre le secteur militaire et le secteur civil. Dans ce dernier domaine, les programmes de recherche que le CEA engage ont une vocation d'appui à l'industrie en particulier ceux concernant les technologies relatives à l'énergie nucléaire et au développement des autres énergies, ainsi que ceux pour les technologies de l'information, de la communication et de la santé.

Dans le cadre de la LOLF, le CEA est l'un des établissements publics, en tant qu'opérateur principal de l'Etat, du programme 188 « recherche dans le domaine de l'énergie » qui fait partie de la mission interministérielle « recherche et enseignement supérieur ».

Ce programme comprend deux actions qui concernent le CEA. L'action n°1 est mise en œuvre en totalité par l'établissement. Elle regroupe les activités de recherche relative à la compétitivité, à la sécurité et au développement de l'énergie nucléaire. L'action n° 2, qui relève partiellement du CEA, retrace l'effort de recherche dans les domaines des nouvelles technologies de l'énergie (NTE).

Dans le cadre de l'action n°1 du programme, le CEA mène des recherches sur différents thèmes :

²⁴ L'organisation du CEA en tant qu'établissement public à caractère industriel et commercial figure dans le Code de la recherche (article L.332-1 et suivants) et fait l'objet de dispositions décrets (décret n° 70-878 du 29 septembre 1970 modifié relatif au CEA et décret n° 72-1158 du 14 décembre 1972 modifié pour l'application du décret du 29 septembre 1970 relatif au CEA).

- les déchets nucléaires. Il s'agit notamment de fournir aux parlementaires et aux pouvoirs publics des analyses sur le ou les modes de gestion les mieux adaptés dans le cadre de la loi du 28 juin 2006 faisant suite à celle du 30 décembre 1991.
- les systèmes nucléaires du futur. Le CEA travaille à la conception et au développement technologique de nouveaux systèmes nucléaires, réacteurs et cycles de combustibles. Ces recherches s'opèrent notamment dans un cadre international représenté par le Forum international Génération IV.
- l'optimisation du parc nucléaire actuel. Pour cet objectif, le CEA mène des recherches sur la tenue des composants et des matériaux, ainsi que sur l'optimisation des combustibles des réacteurs à eau pressurisée.
- le démantèlement et l'assainissement nucléaire. Il s'agit d'assurer le démantèlement et l'assainissement des installations de recherche nucléaire qui sont arrêtées.

S'agissant de l'action n°2 du programme, le CEA mène des recherches sur les énergies non productrices de gaz à effet de serre autres que le nucléaire. Il intervient en priorité dans cinq domaines : l'hydrogène (en ce qui concerne sa production, son stockage, son transport et son utilisation dans les piles à combustibles), l'énergie solaire, notamment photovoltaïque, le stockage de l'énergie électrique dans un objectif d'optimisation de la gestion des sources multiples dans les transports et l'habitat, la transformation de la biomasse par gazéification, ainsi que les matériaux (nano-matériaux).

Depuis l'année 2004, le CEA dispose d'un plan à moyen et long termes (PMLT) portant sur une période de dix ans (2004-2013) approuvé par les tutelles. Le PMLT présente une programmation pluriannuelle des moyens du CEA entre ses différentes activités de recherche (énergie, technologies pour l'information et la santé, etc.), ainsi qu'une évolution des effectifs afférents. Le PMLT est régulièrement actualisé, en fin d'année.

6.2.3 CNRS

Le CNRS, centre de recherche fondamentale sous la tutelle du ministère de la Recherche, a structuré en 2002 un programme interdisciplinaire de recherche sur l'Energie (1000 personnes). Celui-ci faisait suite aux programmes Ecotech (1992), puis Ecodev (1997) et se poursuit actuellement (2006-2009), en concentrant ses efforts sur trois grandes priorités :

- comment réduire les émissions de CO₂,
- comment promouvoir les vecteurs énergétiques,
- comment renforcer l'efficacité énergétique.

Sur le thème spécifique de la production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire et ses déchets, en référence aux lois 2005-781 et 2006-739, le CNRS, dans le prolongement du programme PACE, a mis sur pied PACEN (Programme sur l'Aval du Cycle de l'Energie Nucléaire) qui à partir de 2007 travaille sur l'ensemble des thèmes de recherche amont (mathématique, physique, chimie, géologie) associés aux systèmes du futur (génération IV) ainsi qu'à la gestion des déchets nucléaires

Face aux défis posés, la richesse du CNRS réside certes dans la multiplicité de ses disciplines, mais aussi dans la possibilité de les croiser au sein d'actions transverses telles la socio-économie, l'impact environnemental et le développement durable, impliquant également les apports indispensables de la physique et des matériaux.

1) Vers la production d'énergie avec émission réduite de CO₂

Combustion sans émission de CO₂

La combustion des combustibles fossiles demeure le procédé principal pour produire de l'énergie par conversion chimique. Le challenge réside dans la mise au point de procédés permettant une augmentation de l'efficacité du processus global et une diminution des rejets de polluants (oxydes d'azote et de soufre). La maîtrise de nouveaux régimes de combustion, la flexibilité des installations

au changement de combustibles nécessitent à ce jour une meilleure connaissance des phénomènes de base (dynamique et stabilisation de flammes pour une réduction des polluants, étude des phénomènes thermo-acoustiques, cinétique chimique).

Capture et Stockage du CO₂

Les programmes ANR contribuent à couvrir en partie ce domaine, et le programme du CNRS prendra en complément les problématiques amont (combustion, biomasse, génie des procédés, chimie, géologie et matériaux), capables d'entraîner une réelle rupture technologique en évaluant des procédés non retenus par les options technologiques actuelles.

Biomasse pour biocarburants

Le programme porte sur des recherches fondamentales nécessaires pour optimiser les procédés de transformation de la biomasse en considérant une approche système intégrant la ressource (la plante), sa transformation thermo-chimique ou biologique (innovation en matière de réacteurs spécifiques), en coordination avec l'application visée (production de gaz de synthèse pour des biocarburants ou pour la combustion, huiles, goudrons, charbon de bois, etc.). Par ailleurs, des analyses socio-économiques et d'impact environnemental sont à mener rapidement sur cette filière.

Production d'électricité propre

La production présente fréquemment un caractère intermittent, ce qui est le cas par exemple lorsqu'elle implique la ressource solaire : photovoltaïque (en relation avec le nouvel institut de Chambéry, INES), solaire concentré : voies thermodynamique et photovoltaïque (site d'Odeillo) et se pose alors, plus que pour la chaleur, le problème du stockage de l'électricité produite. Le domaine prometteur de la thermoélectricité sera exploré.

Nucléaire

Le développement des nouvelles filières, fission ou fusion, fait appel à des recherches très amont, relevant des défis scientifiques spécifiques (simulation des réacteurs, physique des plasmas, chimie des sels fondus) : le programme Energie du CNRS opère sur des problèmes communs aux filières fusion/fission qui recouvrent le comportement des matériaux sous irradiation, la modélisation, les problèmes de physico-chimie liés à l'emploi de couvertures métalliques liquides ou de sels fondus, la thermique et les écoulements. Le programme Energie aidera à développer et à structurer la communauté académique travaillant sur la fusion magnétique, autour d'ITER.

Dans son programme PACEN, le CNRS aborde l'ensemble des étapes du cycle des réacteurs du futur en concentrant son action sur un soutien aux programmes ciblés engagés par les acteurs CEA et ANDRA et sur une recherche en amont plus prospective en relation avec les orientations définies par le Forum Generation IV. Ainsi, à côté de recherches sur la modélisation pour les procédés hydrométallurgiques, il maintient une action sur le retraitement par des méthodes pyrochimiques et pyrométallurgiques. De même, à côté d'un soutien à la recherche sur les matériaux innovants, il conduit une recherche sur les sels fondus soit en tant que simples caloporteurs soit comme véhicules du combustible dans la filière sels fondus. Il poursuit aussi ses travaux sur la filière thorium ainsi que de façon générale sur l'ensemble des étapes de la gestion des déchets des parcs actuels et futurs.

2) La promotion des vecteurs énergétiques

Vecteur hydrogène

En termes de production, le CNRS travaille sur les verrous de deux types :

- à court terme, innover à partir de technologies existantes (reformage d'hydrocarbures), pour répondre à la demande d'applications décentralisées et embarquées, de reformeurs de petit débit, compacts, à cinétique performante et à bas coûts ;
- à moyen et long terme, développer de nouvelles solutions de production propre d'hydrogène en grandes quantités, peu polluantes vis-à-vis des gaz à effet de serre (exemple des cycles thermo-chimiques reposant sur le solaire concentré).

Les recherches dans le domaine du stockage de l'hydrogène visent à augmenter la densité énergétique

(compacité du réservoir) ainsi que l'énergie spécifique (diminution du poids du réservoir par rapport à la masse d'hydrogène stockée). Les travaux sur le stockage solide sous forme d'hydrures sous faible pression et température modérée sont activement poursuivis (hydrures complexes réversibles tels que les alanates ou les hydrures métalliques, matrices nanoporeuses, composés intermétalliques...).

Pile à Combustible

Le domaine de la pile à combustible est très largement couvert par les forces du CNRS, regroupées en particulier au sein du nouveau GdR PACTE. Les sujets amont couvrent deux grandes séries de technologies, les piles à membranes protoniques et les piles à oxydes (optimisation des cœurs de pile), et les compétences du CNRS seront également mobilisées en vue de contributions spécifiques innovantes relatives aux DAFC (Direct Alcohol Fuel Cells) et aux SAMFC (Solid Alkaline Membrane Fuel Cells). De plus, un consensus s'est récemment dégagé en faveur du développement de nouveaux concepts concernant les PCFC (Proton Ceramic Fuel Cells).

Vecteur électricité

Les recherches relatives au vecteur électricité concourent à rendre performante et accessible la production distribuée d'électricité à partir de sources d'énergie primaire renouvelable, à substituer l'électricité à d'autres vecteurs énergétiques partout où le gain énergétique ou environnemental le justifie, et à permettre de consommer globalement moins d'énergie. Parmi les grands problèmes à résoudre, citons par exemple les interfaces de conversion, l'optimisation des architectures, le contrôle et la gestion optimale d'énergie, impliquant l'analyse des cycles de vie et la sûreté de fonctionnement.

Vecteurs Chaleur et froid

En terme de production, une attention particulière sera portée à l'exploitation de l'énergie solaire en vue de la production de froid (rafraîchissement pour le bâtiment, congélation...). Le transport de chaleur et de froid fera l'objet de recherches en vue de permettre leur transport à longue distance, le programme précédent ayant permis de situer aux environs de 10km le seuil au-delà duquel les nouveaux procédés reposant sur des systèmes à sorption/désorption s'avèrent rentables.

Le stockage

Ces recherches s'imposent comme indispensable en particulier à l'égard des sources intermittentes. Les enjeux en stockage électrochimique consistent à optimiser les matériaux existants, voire à trouver de nouveaux matériaux (anodes, cathodes, électrolytes, connecteurs...), autorisant des densités et des flux énergétiques accrus.

Le stockage de la chaleur passe par l'obtention de nouveaux matériaux (chaleur latente, changements structuraux...), à divers niveaux de température, par l'amélioration des puissances stockée et déstockée, et par le développement de capteurs intelligents permettant de renseigner sur l'état du stock.

3) L'efficacité énergétique et les économies d'énergie

Économiser l'énergie revient en bonne partie à améliorer l'efficacité des composants et des systèmes énergétiques, qu'ils fassent appel aux ressources classiques ou renouvelables.

Optimisation des systèmes énergétiques

L'amélioration de l'efficacité des systèmes de production, transport, stockage et conversion passe par l'optimisation des composants et de leur intégration dans les systèmes : la modélisation jouera ici un rôle essentiel. Les échangeurs (encrassement, compacité, multifonctionnalité) déterminants dans les cascades énergétiques, les machines (frigorifiques opérant maintenant en régime transitoire), les thermo-transformateurs (récupération d'énergie à bas niveau thermique) feront l'objet d'amélioration de conception, ainsi que leur conduite optimale lors de leur intégration dans les systèmes. On visera la définition et l'optimisation d'entités fonctionnelles (unité de production et de stockage d'énergie raccordée au réseau, ferme éolienne, la centrale virtuelle d'énergie...), et la notion de réseaux intelligents, voire d'ilotage, pourra faire l'objet de travaux communs aux différents vecteurs.

Bâtiment

Dans le secteur du bâtiment, limiter la consommation ($\approx 50\%$ du budget en France) passe en particulier par la réduction des besoins et donc l'optimisation de l'efficacité énergétique (nouveaux matériaux isolants, vitrages actifs...) et l'intégration de sources nouvelles, pour aller à terme vers un bâtiment à consommation d'énergie nulle. Quatre grands axes de recherche ont été identifiés : ambiances, efficacité énergétique des enveloppes, environnement du bâtiment, systèmes et réseaux adaptés aux bâtiments HQE (Haute Qualité Environnementale). Ces recherches devront conduire à des réalisations concrètes, en relation forte avec l'INES (maquette virtuelle, bâtiment intelligent...), impliquant les indispensables analyses socio-économiques (acceptabilité culturelle).

4) Thématiques transverses

Elles concernent en particulier la socio-économie et les sciences humaines, l'impact environnemental et le développement durable, la physique et les matériaux.

Socio-économie

S'il demeure des sujets de recherche connus, (scénarii prospectifs, acceptabilité sociale...), de nouveaux thèmes émergent et doivent être consolidés, tels l'étude des obstacles institutionnels, organisationnels et sociaux vers une économie à bas profil énergétique, les innovations technologiques, institutionnelles, réglementaires et comportementales, et leur diffusion ou encore l'énergie dans le développement humain et social. Le CNRS possède les atouts pour aborder cette dimension socio-économique incontournable.

Développement Durable

Le concept de développement durable implique l'évaluation des impacts environnementaux des choix énergétiques, à différentes échelles de temps et d'espace. Le programme considèrera, parmi les énergies alternatives, la production de biomasse, qui implique le maintien de pratiques agricoles intensives et appelle des recherches indispensables sur la pollution de l'air et de l'eau, l'homogénéisation du paysage et des couvertures végétales, la baisse de la fertilité des sols, l'érosion de la biodiversité. Cet impact des productions agricoles à but énergétique se manifeste dans un contexte de changement climatique et de bouleversement des communautés biologiques qui rend impossible l'extrapolation des tendances actuelles pour cerner l'avenir.

Physique, Matériaux

Les matériaux pour l'énergie se distinguent essentiellement par leurs propriétés fonctionnelles : optiques, électromagnétiques, thermiques... et ont souvent en commun de nécessiter des propriétés de résistance à l'environnement et aux sollicitations mécaniques suffisantes. Les problèmes mettant en jeu des propriétés de tenue en condition de service, sous sollicitations instantanées ou dans la durée pourraient donner lieu à des actions plus transversales. Enfin, la contribution de la physique pour l'énergie pourrait se voir, en particulier à travers l'étude des phénomènes aux micro/nano échelles identifiées dans des secteurs tels les transferts de chaleur, la thermoélectricité ou le photovoltaïque

6.2.4 CSTB

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment a pour mission de procéder à des études et des recherches scientifiques et techniques intéressant la construction et le logement.

Plus précisément son activité comprend à la fois des missions d'intérêt général comme la recherche ou de soutien de l'action des pouvoirs publics (35% de l'activité) et à la fois des prestations dans le champ concurrentiel, comme les études, les évaluations, les essais ou les certifications (65%). A cette fin, il dispose de 670 personnes, dont 55% sont des ingénieurs ou des chercheurs.

Dans les années à venir, le CSTB a identifié quatre enjeux stratégiques, à savoir la ville et le bâtiment durable, la santé et la sécurité, les performances tout au long du cycle de vie des bâtiments, et la diffusion/appropriation des connaissances. Cela se traduit au niveau de la recherche qui représente 25% de son activité, par le choix de quatre thématiques prioritaires de recherche d'un poids à peu près

équivalent. Ce sont la ville durable, la maîtrise des risques, la construction et les évolutions sociables et le bâtiment propre et efficace. C'est principalement ce dernier thème qui reflète l'intervention du CSTB, en matière d'énergie, avec un volet sur les bâtiments à énergie positive et un autre sur la modernisation durable des bâtiments. Seront concernés notamment, l'intégration des ENR (énergies nouvelles renouvelables) l'approche systémique du bâtiment les nouveaux matériaux d'enveloppe, le changement climatique et son impact sur le chauffage-climatisation, les super isolants minces pour la réhabilitation, l'énergie et les nouvelles technologies de l'information.

Mentionnons enfin que l'une des forces majeures du CSTB tient à sa proximité avec les acteurs professionnels et les pouvoirs publics car celle-ci permet une percolation efficace des résultats de la recherche appliquée dans le domaine de la construction.

6.2.5 BRGM

Le BRGM, établissement public à caractère industriel et commercial, est l'établissement public de référence dans le domaine des géosciences pour une Terre durable. Il conduit une triple mission : recherche, expertise publique et coopération internationale.

Ses objectifs sont de comprendre les phénomènes géologiques, développer des méthodologies et des techniques nouvelles, produire et diffuser des données pertinentes et de qualité. Il couvre huit domaines thématiques :

- les ressources minérales,
- l'eau,
- l'aménagement et les risques naturels géologiques,
- les sites et sols pollués, la gestion des déchets,
- la métrologie de l'environnement,
- la cartographie et les connaissances géologiques,
- la géothermie et le stockage géologique du CO₂,
- les systèmes d'information numérique.

Sur les 850 salariés, on dénombre plus de 600 chercheurs ingénieurs et techniciens. Ses équipes interviennent dans plus de 40 pays.

Dans le domaine de l'énergie, il mène des recherches sur la géothermie, la capture et le stockage du CO₂ en aquifères profonds et à un degré moindre, la valorisation énergétique des déchets ménagers.

Les 2 premiers thèmes mobilisent les efforts les plus importants.

- Pour la géothermie, le spectre complet, allant de la très basse énergie jusqu'à la production d'électricité et de chaleur à partir de systèmes naturels et artificiellement simulés est considéré. En particulier pour les pompes à chaleur géothermale, le BRGM étudie, en concertation avec l'Ademe et le CSTB, les performances de tout type d'échangeurs souterrains.
- Pour la capture et le stockage géologique du CO₂, 90% des efforts portent sur le stockage géologique proprement dit et une faible part de l'action se concentre sur des procédés de capture impliquant des espèces minérales. Le BRGM déploie principalement son effort de recherche sur la méthodologie d'évaluation des capacités de stockage en aquifères profonds et la modélisation à long terme du comportement du CO₂ dans le réservoir afin d'établir les critères de sécurité permettant de définir les modalités de mise en œuvre des stockages

En 2006, l'effort sur la géothermie se chiffrait à 1.200 k€, 2.500 k€ pour captage et stockage du CO₂ et 500 k€ pour le stockage de déchets nucléaires toujours dans le cadre de projets pilotés et cofinancés par l'ANDRA.

A cet effort consenti sur la dotation, s'ajoutent des cofinancements en provenance de la Commission Européenne, de l'ANR, de l'ADEME et à un degré moindre des collectivités territoriales. Le total de ces cofinancements se monte pour 2006 à environ 70% des budgets mobilisés sur la dotation.

6.2.6 INRA

Etablissement public de recherche finalisée, travaille essentiellement sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

Les objectifs de l'INRA pour 2006-2009 comportent un développement significatif des moyens consacrés aux recherches sur la « biologie et la chimie du végétal » pour développer des pistes nouvelles d'utilisation non alimentaire du carbone végétal renouvelable. L'énergie notamment via les thèmes « biocarburants » et « bio combustibles », ... est donc bien présente dans les nouvelles ambitions scientifiques de l'INRA.

L'INRA a pour cela lancé une réflexion « Carbone renouvelable et bio-industrie », qui a eu pour objectif d'analyser la situation actuelle et de faire des propositions afin de :

- définir des conditions de productions végétales, y compris forestières, dont les bilans écologique, agronomique et économique seront optimaux ;
- enrichir les méthodes de transformation, soit pour améliorer les rendements actuels, soit pour valoriser l'énergie contenue dans des produits encore aujourd'hui délaissés, soit pour diversifier les usages en chimie verte ;
- caractériser les contextes macroéconomiques de ces filières qui pourraient bouleverser les équilibres actuels au sein de la production agricole mondiale ;
- étudier les conditions de l'acceptabilité de ces évolutions à l'échelle de l'exploitation agricole ou forestière, ou bien par les associations de protection de l'environnement ou plus largement pour le citoyen.

La mission, achevée fin juillet 2006, a par ailleurs permis de proposer un positionnement global de la stratégie INRA dans un contexte européen et national, des développements de dispositifs et des profils de recrutement souhaitable de chercheurs ou ingénieurs.

Actuellement une cinquantaine de personnels INRA, chercheurs et ingénieurs, (et en 2007-2008, une quinzaine de recrutements supplémentaires) se répartissent sur les thématiques suivantes :

- optimisation des ressources agronomiques pour les biocarburants de 1^{ère} génération pour améliorer les rendements actuels, et valoriser l'énergie contenue dans les coproduits (amélioration des plantes et biotechnologies végétales ; amélioration du rendement énergétique par l'utilisation des biotechnologies vertes) ;
- développement de biocarburants de seconde génération (procédés des systèmes biotechnologiques, ingénierie des réactions biologiques, transformation de la lignocellulose) ;
- conditions optimales de production aux plans des bilans écologique, agronomique et économique, écobilans, analyses du cycle de vie (environnement et grandes cultures, agronomie) ;
- économie des filières et des exploitations, conséquences sur les marchés et interaction alimentaire –non alimentaire (économie publique, économie des ressources naturelles, économie forestière / bois énergie).

Pour l'avenir, l'INRA a en outre proposé la création d'un Institut Carnot sur la chimie du carbone renouvelable pour rendre l'offre de la recherche publique plus accessible aux partenaires professionnels intéressés.

Le budget pour 2006 a été de 47 ETP, soit 3,8 M€ (masse salariale, fonctionnement et équipement) hors financements spécifiques des projets par l'ANR et la Commission européenne.

6.2.7 Autres organismes

De nombreux autres organismes, établissements publics à caractères industriel et commercial ou établissements publics à caractère scientifique, conduisent des recherches sur des thèmes énergétiques

particulièrement focalisés. A titre d'exemple, les écoles des mines travaillent sur l'économie et les technologies énergétiques, ...

Dans le domaine nucléaire, en parallèle du développement des nouveaux systèmes, une capacité de recherche et d'expertise doit être développée dans le domaine de la sûreté et de la sécurité. L'IRSN est plus particulièrement chargé de cette thématique.

6.3 Moyens impartis

6.3.1 La loi organique

La loi organique relative à la loi de finance a prévu un programme de recherche dans le domaine de l'énergie (N°188) qui s'articule en trois thèmes :

- Compétitivité, sécurité et développement de l'énergie nucléaire,
- Compétitivité et développement du secteur des hydrocarbures et de ses infrastructures, diversification des réserves,
- Nouvelles technologies de l'énergie

Mais il existe aussi, au sein du programme N° 189 « recherche dans le domaine des risques et des pollutions » l'action n°4 –recherche et développement dans le domaine de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie - qui concerne l'énergie et effet de serre : bâtiment sans effet de serre (PREBAT), transports propres (PREDIT), hydrogène et piles à combustible, énergies renouvelables (photovoltaïque, bio-ressources, géothermie) capture et stockage du CO2.

6.3.2 Les ministères

Trois ministères, le ministère chargé de la recherche, le ministère chargé de l'industrie et le ministère chargé de l'écologie et du développement durable, ont la responsabilité de coordonner la mise en œuvre de la politique de la recherche publique dans le domaine de l'énergie. Ils l'assument, notamment, par la tutelle des organismes spécialisés et des structures décentralisées qui leur sont rattachées. Concernant le ministère de la recherche un GIP a été créé en 2005, l'Agence Nationale de la Recherche (ANR, devenue un EPA en 2006) dont une des thématiques (« énergie durable et environnement ») regroupe les nouvelles technologies de l'énergie. Au ministère de l'industrie, deux directions sont concernées par la recherche sur les énergies : la direction générale des entreprises (DGE) qui gère le fond de compétitivité aux entreprises (FCE) et la direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP) qui définit et met en œuvre la politique énergétique nationale. Le ministère de l'écologie et du développement durable comprend la direction des études économiques et de l'évaluation environnementale (D4E) ainsi que la direction de la prévention, de la pollution et des risques (DPPR), plus particulièrement intéressées par l'impact de l'énergie sur l'environnement et celui de l'environnement sur les choix énergétiques.

6.3.3 Bilan des budgets

Tableau -35 – Bilan des budgets par grands domaines depuis cinq ans

M€		2002	2003	2004	2005	2006
IFP¹	Moteur / Énergie	39,9	40,2	41,7	45,3	48,3
	Raffinage	80,1	80,3	79,2	78,9	86,8
	dont Biocarburants et H2					20,3
	Gisements hydrocarbures	90,5	96,2	92,1	91,5	93,6
	dont CSC+					16,9
BRGM²	CSC	1,2	1,2	1,6	2,0	4,6
	Carburants fossiles	0,7	0,7	1,0	1,5	2,5
	géothermie	1,0	1,3	1,4	1,4	1,2
	Nucléaire (cycle combustible)					
CEA³	NTE	41,0	47,0	49,0	50,0	63,0
	Optim. nucléaire indus	363,0	324,0	292,0	293,0	289,0
	R. Déchets	116,0	137,0	154,0	134,0	137,0
	Syst. nucléaires futurs	40,0	50,0	57,0	57,0	69,0
CNRS⁴	Effort sur l' Énergie	54,1	60,6	66	71,1	74,5

¹ Coût complet, 2002 à 2005 en réalisé, 2006 budget

² Ressources mobilisées : dotations de l'État + ressources contractuelles.

³ Subvention + recettes externes + fonds dédiés + solde de gestion

⁴ H/an affectés au programme énergie + subvention du programme énergie

6.4 Positionnement international

6.4.1 Evolution des budgets en Europe

6.4.1.1 PCRD

Le soutien à la recherche, pour le domaine de l'énergie (hors environnement), apporté par l'Union Européenne semble être resté constant sur les dix dernières années et de l'ordre du milliard d'euros

Par contre la répartition au sein de ce domaine a beaucoup varié.

D'un budget totalement consacré au pétrole et au gaz à la fin des années 80, celui ci a évolué avec le programme de démonstration Thermie (700 M€) réparti de manière égale entre : ¼ pour le pétrole et le gaz, ¼ pour le charbon, ¼ pour l'efficacité énergétique, ¼ pour les énergies renouvelables, auquel vient s'ajouter le programme Joule (300 M€) pour la R&D pure.

Dans le 4^{ème} PCRD (1994-1998) le budget de Thermie (de l'ordre de 700 M€) se répartit en 1/3 pour les combustibles fossiles, 1/3 pour l'efficacité énergétique et 1/3 pour les énergies renouvelables auquel vient s'ajouter le programme Joule (300 M€) pour la R&D pure.

Dans le 5^{ème} PCRD (1998- 2002) la thématique affichée était « préserver l'écosystème » avec deux volets : un premier volet sur l'énergie dont le budget était de l'ordre du milliard et un deuxième volet

sur l'environnement et le changement climatique avec le thème « villes de demain » qui traitait de l'efficacité énergétique dans les transports

Le 6^{ème} PCRD (2003 – 2006), doté de 16,27 Milliards d'euros sur 2003-2006 s'attache à mettre en œuvre le livre blanc relatif à l'espace européen de la recherche (EER). Il s'articule autour de 2 chapitres : « Concentrer et Intégrer la recherche communautaire » et « Renforcer les bases de l'espace européen de la recherche ». Le premier est doté de 12,585 Milliards d'euros, et énonce 7 domaines thématiques prioritaires de recherches dont le 6^{ème} est le développement durable, changement planétaire et écosystèmes,

Cette priorité 6, dotée de 2 120 M€, était subdivisée en 3 thèmes qui étaient :

- systèmes énergétiques durables (810 M€),
- transports de surface durables (610 M€),
- changement planétaire et écosystèmes (700 M€).

Il apparaît donc que les projets énergétiques, notamment ceux qui concernent l'utilisation rationnelle de l'énergie et les énergies renouvelables, trouvaient une place privilégiée dans le 6^{ème} PCRD.

Le 6^{ème} PCRD était orienté vers des projets de grande envergure, gérés par l'un des participants (le coordinateur) sous le contrôle des services de la Commission. Toutefois, le soutien à des projets « traditionnels » (plus orientés vers un aspect spécifique d'une technologie) reste essentiel car porté par de nombreux Etats Membres.

De nouveaux outils ont été expérimentés (les projets intégrés, les réseaux d'excellence et les actions ciblées) et l'expérience est jugée satisfaisante. Il avait été décidé dès le départ de consacrer au moins 65 % des crédits aux nouveaux instruments et ce chiffre est respecté.

Concernant l'énergie, le budget de 810 M€ a été partagé à égalité entre le long terme (R&D) et le court terme (démonstration).

L'économie énergétique de l'Europe, comme celle du reste du monde, doit désormais se placer dans une perspective de développement durable. Sécurité des approvisionnements, compétitivité, propreté et réduction des gaz à effet de serre, sans oublier une plus grande efficacité dans l'utilisation, deviennent les piliers de la nouvelle politique énergétique. Aucune technologie ne pouvant suffire à elle seule, le programme de recherche du 7^{ème} PCRD porte sur un ensemble de domaines et d'approches techniques ; la préoccupation d'efficacité énergétique les imprégnant tous et les reliant aux autres priorités thématiques.

Le 7^{ème} PCRD (2007-2013) Le budget global du PCRD 7 s'élève à 50 521 Millions d'euros dont 32 365 M€ pour la coopération. L'énergie, hors recherche nucléaire, est dotée de 2350 M€ (en euros constants), ce qui affirme qu'elle est bien une priorité. Ce PCRD 7 se situe dans la prolongation du précédent : même instruments utilisés, gestion sur le même modèle.

Les thématiques se répartissent sur « hydrogène et piles à combustible », « électricité renouvelable », « carburant renouvelable », « chauffage et climatisation renouvelables », « capture et stockage du CO₂ », « charbon propre », « réseaux intelligents » et « économies d'énergie » en recherchant les synergies.

Le 7^{ème} PCRD EURATOM (2007 – 2011) se monte pour sa part à 1947 M€ pour la fusion, 287 M€ pour la fission et la radioprotection et 517 M€ Joint Research Center (JRC).

6.4.1.2 Plats formes

Les plates formes technologiques européennes sont un moyen de définir des priorités, des calendriers et des plans d'action dans un certain nombre de domaines stratégiques pour lesquels les objectifs de croissance, de compétitivité et de durabilité dépendent d'avancées scientifiques et technologiques majeures à moyen et long terme. L'idée en a été lancée par la Commission en 2003.

Elles fournissent un cadre pour relever de grands défis technologiques, à l'intérieur duquel industrie, communauté scientifique et monde financier peuvent se rassembler et se mettre d'accord sur des

actions concrètes de R&D à long terme.

Leur développement se fait généralement en trois étapes :

- élaboration d'un document définissant ce qui est d'importance stratégique pour l'activité en question, et développant une « vision » (Vision 2030, par ex.) du secteur à long terme, technologique et économique, voire sociologique. Ce document doit exprimer le consensus des participants et recevoir l'aval des responsables des principales entreprises.
- définition d'un agenda stratégique de recherche, document clef des plates formes, qui expose les priorités scientifiques et technologiques à moyen et long terme.
La rédaction de l'agenda est coordonnée par un conseil consultatif (advisory council), qui représente l'ensemble des parties prenantes, et effectuée, dans leurs domaines respectifs, par des groupes de travail spécialisés.
Les représentants des états peuvent se réunir au sein d'un groupe miroir.
Les plates formes commencent à ce stade à définir une stratégie de déploiement anticipant les éléments clefs nécessaires pour réaliser l'agenda (mécanismes associant investissements publics et privés, formation, communication, synergie entre plates formes, etc.).
- mise en œuvre de l'agenda avec le soutien des programmes communautaires appropriés (PCRD et autres financements communautaires), programmes de recherche nationaux, financements privés.

D'une manière générale, chaque plate forme a sa propre origine, sa propre approche et sa propre façon de travailler. La structure d'une plate forme peut évoluer à chacune de ces étapes et des parties peuvent la rejoindre ou la quitter à tout moment, et de nouvelles initiatives peuvent être prises.

A l'heure actuelle, il existe plus de trente plates formes technologiques européennes. Leurs travaux ont joué un rôle déterminant pour l'élaboration des programmes de travail des différentes priorités thématiques du 7^{ème} programme cadre.

Un nombre limité de plates formes offrant la possibilité d'avancées technologiques importantes, et requérant une coordination à grande échelle et à long terme, nécessiteront un mécanisme de financement particulier. Elles feront l'objet d'initiatives technologiques conjointes (Joint Technology Initiative). Cela devrait être le cas pour l'hydrogène et les piles à combustible.

Il y a aujourd'hui six plates formes qui concernent le domaine de l'énergie : l'hydrogène et pile à combustibles, les réseaux électriques intelligents, le photovoltaïque, le solaire thermique, les biocarburants et le CO2. Une autre est en projet pour l'éolien.

6.4.2 *Evolution internationale*

Options retenues par les principaux pays intervenants dans le domaine :

6.4.2.1 Etats Unis

Les Etats Unis font porter leurs efforts sur la filière hydrogène (US promoteur de l'IPHE International Partnership for Hydrogen Economy), la séquestration du CO2 et surtout sur l'intégration de ces technologies dans les centrales de production d'électricité à base de charbon dans le cadre de leur programme « clean coal ». Du côté des bioénergies, la priorité est donnée aux biocarburants avec une forte orientation sur l'industrialisation puisque la finalité des programmes soutenus par l'OBP (Office for biomass production) est de mettre en œuvre à court terme (2010) des bioraffineries.

Les Etats Unis sont par ailleurs à l'origine d'une initiative de partenariat global sur l'énergie nucléaire (Global Nuclear Energy Partnership GNEP), pour développer des principes et des technologies de recyclage résistants aux risques de prolifération, grâce auxquelles l'énergie nucléaire pourra se développer en sécurité dans le monde.

6.4.2.2 Canada

Au Canada, les travaux sur les Piles à Combustible restent une action dominante. Il n'y a pas d'initiative particulière connue en R&D dans le domaine de l'énergie nucléaire.

6.4.2.3 Japon

Au Japon l'objectif est la sécurité des approvisionnements en pétrole et en gaz. Le Japon est un acteur majeur de l'énergie nucléaire : 54 réacteurs opérationnels, 65 prévus en 2030 (soit 30 à 40% de la production d'énergie). Il existe une forte augmentation de la R&D industrielle dans les domaines de l'énergie avec de nombreuses références dans les avancées technologiques, notamment pour les piles à combustible. C'est un pays qui possède de nombreuses expériences dans le domaine des économies d'énergie. Energie solaire : technologies et expérimentations.

On note une implication forte, soutenue par les politiques, dans le domaine de la recherche sur les réacteurs rapides : relance des programmes, augmentation du budget. Ce regain d'intérêt est illustré par le déblocage des procédures judiciaires qui paralysaient depuis 10 ans les travaux de réaménagement, suite à l'accident de 1995, du réacteur à neutrons rapides à sodium de Monju. Le processus de redémarrage du site a, en effet, été enclenché par le début du chantier en septembre 2005 avec un objectif de mise en fonctionnement début 2008. La volonté, récemment affichée par l'AEC (Atomic Energy Commission) qui définit et coordonne l'ensemble du budget de la R&D nucléaire, de créer un organisme qui permettra de fédérer les programmes industriels avec ceux des instituts de recherche, en vue de favoriser la mise au point des démonstrateurs GENIV des filières réacteurs rapides dans lesquelles le Japon est impliqué (transmutation à grande échelle dans Monju en 2015, démonstrateur réacteur rapide à gaz en 2025), montre également les efforts engagés par le Japon dans ce domaine.

6.4.2.4 Grande-Bretagne

En juillet 2006 a été publié un rapport sur l'énergie à la mesure des enjeux de demain qui fait apparaître le changement climatique et l'insécurité des approvisionnements comme des menaces. Les orientations proposées sont de : diminuer la demande d'énergie, développer les sources d'énergie propre à faible émissions de carbone (énergies renouvelable et nucléaire), réduire en 2050 les émissions de CO₂ de 60% par rapport au niveau de 1990. Mais l'essentiel des progrès pourront être réalisés après 2020. En 2020, la réduction sera seulement de -5 à 6% par rapport à 2005. Au-delà de 2020, la capture et stockage du carbone permettront d'augmenter cette réduction.

Pour les biocarburants le rapport préconise : 5% en 2008, 10% en 2010.

Il est prévu, la création d'un « office of climate change » pour suivre les progrès de la réduction des émissions.

Il est nécessaire de trouver un cadre économique de long terme pour l'investissement dans des technologies de production économes en énergie et en émissions de gaz à effets de serre.

Les technologies prioritaires sont :

- efficacité du système électrique global (problème des périodes de pointe)
- transport propre (hydrogène, biocarburants, hybrides)
- fusion nucléaire.

La Grande Bretagne a aussi créé, pour 10 ans, un « national institute for energy technologies », en partenariat public – privé, avec E.ON UK, EDF Energy, Shell, BP. Coprésidé par D.King (chief scientist) et P.Golby (DG d'E.ON UK).

La Grande Bretagne développe aussi les énergies marines. 35M€ de R&D y ont été consacrés depuis 1999.

La relance du nucléaire en Grande-Bretagne a été clairement affichée lors du discours de Tony Blair du 16 nov. 2006. Pour accompagner ce regain, les efforts à développer dans le domaine de la R&D sont concrétisés par la prochaine création à Cumbria du NNL (National Nuclear Laboratory) qui

regroupera les actuels BTC (British Technology Centre) et Nexia Solutions (Filiale Recherche du groupe BNFL British Nuclear Fuel). Cette nouvelle a été notamment confirmée par le Parlementaire Lord Truscott lors du démarrage à Paris du Forum Nucléaire Franco-Britannique, autre témoin de la volonté d'accroissement de la recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire anglaise.

6.4.2.5 Inde

L'Inde est le 6^{ème} consommateur d'énergie dans le monde, avec 538 MTEP, dont 184 de biomasse, essentiellement du bois. Une forte croissance est prévue.

Enjeux géopolitiques forts : réflexions sur la sécurité des approvisionnements, projets de gazoduc Iran – Pakistan – Inde, relations avec la Chine.

A peu près la moitié de la production d'électricité se fait à partir du charbon indien, qui est un charbon plutôt pauvre et polluant. Intérêt pour les technologies de combustion propre du charbon pour la production d'électricité.

Investissement dans le nucléaire : participation à Iter.

Un accord récent a eu lieu avec les USA qui vont les aider à traiter leur charbon et à préparer une révolution verte « deuxième génération » pour la production de biomasse (OGM ?).

L'Inde s'implique beaucoup dans les forums :

- Rencontre Europe – Inde d'avril 2006 : économies d'énergie, biocarburants, technologies propres du charbon pour la production d'électricité et stockage géologique du CO₂.
- Sommet UE – Inde d'octobre (Helsinki) : questions climatiques et énergétiques.
- Forum énergétique germano-indien en avril 2006.

Coopération avec la France : un groupe ministériel énergie franco-indien (DGEMP) a été créé. Il existe aussi une coopération avec l'ADEME sur les économies d'énergie et un séminaire a eu lieu en Inde au 2^{ème} semestre 2006.

Dans le domaine des énergies renouvelables :

Eolien. Devenu en 2005 le 4^{ème} mondial pour l'éolien devant le Danemark.

Photovoltaïque : 300 jours d'ensoleillement par an. Raccordement électrique de villages isolés sans électricité, pompes à eau, alimentation des réseaux télécoms. Programme de prêts pour l'énergie solaire en Inde créé par le PNUE. Eclairage public solaire à Kolkatta.

A noter, la décentralisation des centres de R&D de grands groupes tels que GE, Daimler, Exxon...).

L'Inde maîtrise l'ensemble du cycle du combustible et possède des installations de qualité et un personnel scientifique de haut niveau.

Ce pays, qui exploite aujourd'hui 15 réacteurs, espère tripler sa capacité nucléaire dans les 6 ans à venir. Il est, de fait, engagé dans un programme de construction dont l'ampleur n'a jamais été auparavant atteinte. Les Etats-Unis et la France se sont rapprochés récemment de l'Inde dans le domaine du nucléaire civil. Cependant, du fait de sa non-ratification du traité de non-prolifération nucléaire, sa coopération avec les membres du Groupe des fournisseurs nucléaires est encore difficile. Un accord visant à sortir l'Inde de son isolement nucléaire a été conclu en mars entre New Delhi et les Etats-Unis et est actuellement soumis à l'approbation du Congrès américain.

6.4.2.6 Chine

Il faut faire la distinction entre les thématiques de recherche sur lesquels les Chinois nouent des partenariats pour bénéficier d'un transfert de technologie (bâtiments, production d'électricité,...) et les thématiques sur lesquels ils engagent des programmes de R&D consistants comme :

- Le pétrole (technologies amont, géophysique, et aval, procédés)
- Le charbon (procédés de liquéfaction directe et indirecte via la gazéification)
- L'automobile en général
- Les batteries
- L'électronique notamment embarquée
- Le stockage de l'énergie avec priorité sur les véhicules, piles à combustibles et charbon propre).

La stratégie chinoise de recherche dans le domaine des réacteurs nucléaires se déploie entre ses efforts menés d'optimisation et d'accroissement de son parc actuel de 2^{ème} génération, ses projets concrets de démarrage dès 2011 de réacteurs de 3^{ième} génération (achat de 4 AP1000) et sa coopération récente dans le forum Génération IV (rejoint formellement le 30 nov. 2006) qui pourrait s'appuyer dans l'avenir sur des réalisations déjà opérées (HTR-10 de type PBMR à l'INET Institut of Nuclear and New Energy Technology) ou sur d'autres, en projet ou en passe d'être achevées prochainement (CEFR, réacteur rapide au sodium de 65 MWth, dont la mise en service est prévue pour 2010, projet de HTR à l'échelle industrielle).

La Chine, d'ici à 2020 comptera 30 réacteurs de plus dans son parc.

D'autre part, la Chine, possédant déjà une R&D très développée dans le domaine de la fusion (3 installations de type Tokamak dans les instituts de recherche de Chengdu et d'Hefei) poursuit ses travaux dans le cadre de son adhésion au projet ITER avec sa toute dernière machine EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) dont la construction s'est achevée fin 2006.

6.4.2.7 Corée du Sud

La Corée du Sud fait de gros efforts sur le stockage de l'énergie à côté des Japonais et des Chinois.

La loi « fusion energy development promotion act » votée par le parlement coréen le 30 nov. 2006, qui garantit la participation financière de la Corée du Sud au programme ITER, confirme le fort engagement de ce pays dans le domaine de la fusion. Sur le même plan, la fin de la construction de KSTAR (Korean Superconducting Tokamac Advanced Research) à Daejeon, prévue en août 2007, confirme son implication nationale dans ce domaine.

La politique volontariste de la Corée du Sud dans la recherche sur les nouvelles énergies est également visible dans son programme de R&D en photovoltaïque dont les moyens financiers en constante progression jusqu'en 2012 sont clairement affichés, date pour laquelle le gouvernement coréen espère occuper 10% du marché mondial.

Enfin, la R&D associée au maintien et à l'optimisation du parc électronucléaire sud coréen n'a de cesse de se poursuivre par le biais de plusieurs programmes associant les industriels aux instituts de recherche.

6.4.2.8 Allemagne

Les programmes de recherche ont pour objectif de doubler la productivité énergétique du pays entre 1990 et 2020. Ils portent notamment sur le secteur de la construction avec des projets sur les « maisons à basse consommation », mais aussi sur l'hydrogène-combustible, la technologie des petites piles à combustible et, dans le domaine des énergies renouvelables, sur les éoliennes offshore ou la production de combustible à partir de biomasse. On peut également noter un volume de travail significatif sur le solaire thermique.

Compte tenu de la volonté de remplacement du nucléaire allemand par d'autres sources d'énergie, l'effort de R&D dans le domaine nucléaire allemand porte essentiellement sur le traitement des déchets et la radioprotection. Il est ralenti par des conflits politiques rendant encore incertain le choix du site retenu pour y mener les études qui s'y rapportent.

6.4.2.9 Italie

Acteur historique dans le domaine de la géothermie, sans qu'une recherche spécifique soit très visible, l'Italie joue un rôle important dans le développement de la chimie végétale (nouveaux polymères), et a été pionnier dans l'industrialisation de la pile à combustible.

Pas d'initiative particulière connue en R&D dans le domaine de l'énergie nucléaire.

6.4.2.10 Russie

Pour accompagner sa volonté de passer de 16% de production d'électricité nucléaire à 25% en 2030, comme annoncé en janvier 2006 dans le rapport de son agence fédérale à l'énergie nucléaire ROSATOM, la Russie devrait construire une quarantaine de réacteurs dans les 15 ou 20 prochaines années.

Cette dynamique, concrètement engagée (approbation par le gouvernement russe du programme fédéral sectoriel de développement de l'énergie nucléaire et projet de loi associé à la propriété des matières) et centrée sur le regroupement des grosses capacités industrielles russes se complète par les annonces faites par le Président Poutine le 25 janvier 2006, selon lesquelles la Russie serait prête à offrir des services de « leasing » de combustible et à étudier la possibilité d'accueillir des installations internationales du cycle de combustible (centre prototype mondial de services de combustibles nucléaires).

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AERES	Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement supérieur
AFPAC	Association française pour les Pompes à Chaleur
AGRICE	AGRIculture pour la Chimie et l'Energie
AIE	L'Agence Internationale de l'Energie
AII	Agence de l'Innovation Industrielle
ANDRA	Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs
ANR	Agence National de la Recherche
ANVAR	Agence Nationale de Valorisation de la Recherche
BDPME	Banque du Développement des PME
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CAI	Controle d Auto-Ignition
CATTEL	Programme Catastrophes Telluriques et Tsunamis
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CEMAGREF	Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
CEREN	Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'ENERGIE
CETIAT	Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermique
CIS	Diséléniure de Cuivre et d'Indium CuInSe
CIVEPE	Commission Interministérielle pour les Véhicules Propres
CNRS	Centre National de Recherche Scientifique
COSTIC	Centre d'études et de formation génie climatique
CRITT	Centre Régional d'Innovation et de Transfert de Technologie
CSC	Capture et Stockage du Carbone
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
CTBA	Centre Technique du Bois et de l'Ameublement
D4E	Direction des Etudes Economiques et de l'Evaluation Environnementale
DGE	Direction Générale des Entreprises
DGEMP	Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières
DGRI	Direction Générale de la Recherche et de l'Innovation
DME	Di-Méthyl Ether
EGS	Engineering Geothermal System
EIE	Intelligent Energy Europe
EMHV	Esters méthyliques d'huiles végétales
ENR	Energies Renouvelables
ENSCP	Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Paris
ENTPE	Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État
EPA	Etablissement Public Administratif
EPIC	Établissement Public à Caractère Industriel et Commercial
EPR	European Pressurized Reactor
ERANET	Networking of National or Regional Programmes
ETBE	éthyl tertio butyl éther
FCE	Fonds de Compétitivité des Entreprises
GdR	Groupement de Recherche
GES	Gaz à Effet de Serre
GFR	Groupe Foncière des Régions
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIMVE	Groupement Interministériel pour la Mobilité et le Véhicule Electrique
GIP	Groupement d'Intérêt Public
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GTL	Gaz To Liquid
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition

IFP	Institut Français du Pétrole
IGCC	Gazéification Intégrée à un Cycle Combiné
INES	Institut National de l'Energie Solaire
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
IPGP	Institut de Physique du Globe de Paris
IRDEP	Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque
IRSN	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
LED	Light Emitting Diode
LERMAB	Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois
LFI	Loi de Finance
LFR	Loi de Finance Rectificative
LOLF	Loi Organique relatives aux Lois de Finances
MDE	Maîtrise de l'Energie
MENSER	Ministère de l'Éducation Nationale de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
MIB	Materials and systems Institute of Bordeaux
NTE	Nouvelles Technologies de l'Energie
NTIC	Nouvelles Technologies de l'Information et des Communications
OLED	Organic Light-Emitting Diode
OPEP	Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole
PAC	Pile à Combustible ou Pompe à Chaleur selon les paragraphes
PAN-H	Plan d'Action National sur l'Hydrogène
PIP	Plan Indicatif Pluriannuel
PLF	Projet de loi de finance
PMLT	Plan à Moyen et Long Terme
PNRB	Programme National de Recherche sur les Bioénergies
PPI	Programmation Pluriannuelle des Investissements
PREBAT	Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'Énergie dans le BATiment
PRECODD	Programme Eco Technologies et Développement Durable
PV	Photovoltaïque
PVPS	Photovoltaic Power Systems Programme
RGCU	Réseau pour la recherche et l'innovation en génie civil
RTPG	Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières
RTRA	Réseau Thématique de Recherche Avancée
TPE	Très Petites Entreprises
VPE	Plan Véhicules Propres et Economes