

**Nouvelles  
technologies  
*de l'énergie***

**Rapport**



*Le ministre de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, la ministre de l'Écologie et du Développement durable, la ministre déléguée à la Recherche et aux Nouvelles Technologies et la ministre déléguée à l'Industrie ont confié le 17 mars 2003 <sup>(1)</sup> à un groupe de travail <sup>(2)</sup> la mission « d'identifier des objectifs et des axes de priorité pour la recherche française et européenne » sur les nouvelles technologies de l'énergie et « de proposer des recommandations sur l'évolution des dispositifs de soutien à la recherche et à l'innovation pour atteindre ces objectifs », en vue de permettre à la France de faire face aux défis de l'énergie dans des conditions satisfaisantes pour le développement économique et pour l'environnement, en particulier pour contenir le réchauffement climatique.*

*Le groupe de travail a estimé qu'il lui fallait prendre en compte l'ensemble des enjeux liés à l'énergie et pas seulement celui du changement climatique, même si celui-ci constitue désormais une préoccupation majeure, à laquelle doit répondre la politique de l'énergie, notamment dans sa composante de recherche et développement.*

*Au titre du changement climatique, le groupe n'a traité que des émissions de dioxyde de carbone, qui constituent plus de 90 % des émissions de gaz à effet de serre liées au secteur de l'énergie.*

*Pour répondre aux questions qui lui étaient posées, le groupe de travail a considéré qu'il lui fallait d'abord présenter un constat sur le contexte dans lequel les nouvelles technologies de l'énergie devront s'inscrire.*

*Sur la base de ce diagnostic, il s'est efforcé d'identifier les objectifs qui aideront à sélectionner les thèmes et/ou projets de recherche que l'ensemble des acteurs concernés, Union européenne, État français et Industrie devraient reconnaître comme leurs **priorités**, que leur horizon soit le court terme (2005/2010), le moyen terme (2020) ou le long terme (2050), qu'ils visent les ressources, les vecteurs ou les usages.*

*Du diagnostic présenté et des priorités ainsi définies, le groupe de travail a déduit, comme le souhaitaient les ministres, des **recommandations** sur « l'évolution des dispositifs de soutien à la recherche et à l'innovation ».*

**Thierry Chambolle,**  
conseiller du président de Suez  
pour le développement durable

**Florence Méaux,**  
conseiller référendaire  
à la Cour des comptes

<sup>(1)</sup> Lettre de mission en annexe I.

<sup>(2)</sup> Composition en annexe II.

Dans cette annexe figure également la liste des personnalités consultées par le groupe de travail ou qui d'une manière ou d'une autre lui ont apporté leur concours.



# Résumé

---

Pour réduire à l'horizon 2050 les émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine au niveau de ce que la planète paraît en mesure de recycler naturellement et compte-tenu des ambitions légitimes de développement des pays du sud, il sera nécessaire aux pays industrialisés, et en particulier à la France, de réduire leurs émissions par un facteur 3 à 5 d'ici 2050. C'est en soi un défi majeur. Mais il est rendu encore plus difficile sur la période considérée par une tendance spontanée à une croissance de la demande en énergie, même dans les pays industrialisés comme la France et par la possibilité de toujours satisfaire, sans risque immédiat d'épuisement, une part majoritaire de cette demande à partir des réserves d'énergies fossiles accessibles.

La réponse à ce défi, dont les acteurs économiques n'ont pas encore pris toute la mesure, nécessitera des évolutions dans les comportements, la réglementation, les prix de l'énergie mais surtout des innovations technologiques indispensables pour maintenir, voire améliorer encore, le niveau de vie des français et la compétitivité internationale de la France qui sont indissolublement liés.

Conformément à son mandat, le groupe a centré ses travaux sur ce seul domaine des innovations technologiques et comparé les efforts actuels ou programmés de R & D des grands pays industrialisés.

En dépit des déficiences généralisées de l'appareil statistique, il a constaté que l'addition des financements publics des pays de l'Union européenne et du programme cadre de recherche et développement européen (PCRD) conduisait à un effort de recherche dans le domaine de l'énergie inférieur à l'effort consenti respectivement par les États Unis et le Japon.

Pour faire jeu égal avec ces pays, l'Europe doit accentuer son effort financier mais elle doit surtout et d'abord surmonter le handicap lié à la jeunesse relative de sa constitution et à la complexité de ses modes de décision et de fonctionnement, en améliorant de manière substantielle l'organisation et la coordination de sa recherche dans l'énergie.

Le groupe propose, à cet effet, de confirmer le leadership de l'Europe pour la conduite des grands programmes de R & D sur la fusion, l'hydrogène et la pile à combustible, la séquestration du dioxyde de carbone, et d'une manière sans doute différente les grands réseaux électriques européens, en demandant à tous les acteurs nationaux concernés de travailler dans ce cadre. Il suggère que, corrélativement, l'Europe accepte de s'impliquer financièrement dans les programmes « Eureka » consacrés à la maîtrise de l'énergie, suivant des modalités simples à définir avec elle.

Ainsi, l'Europe qui a eu le courage de prendre des décisions unilatérales sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et pris le risque de générer des distorsions de concurrence, pourrait, à la fois, être l'interlocuteur efficace des USA et du Japon pour quelques grands programmes de moyen et de long terme et contribuer à l'amélioration des positions concurrentielles de ses propres industries.

Elle devrait parallèlement renforcer son organisation, prévoir dans le 7<sup>e</sup> PCRD un programme prioritaire de R & D dans l'Énergie, regrouper dans une direction générale unique les crédits correspondants et viser davantage, au travers de ce programme, l'efficacité de la recherche que l'intégration européenne.

Au sein de l'ensemble européen, l'effort français est significatif ce qui est cohérent avec ses ambitions dans l'Europe de l'Énergie. Cet effort est surtout focalisé sur le nucléaire et les fossiles. En outre, l'organisation actuelle de la R & D publique n'est pas complètement adaptée à ce nouveau défi et les industriels français, s'ils ont montré leur volonté d'y faire face en s'engageant dans des programmes de réduction des émissions dans le cadre de l'AERES, doivent encore préparer et engager les programmes de R & D nécessaires pour maintenir ou renforcer leur compétitivité dans ce nouveau contexte énergétique.

Sur ces bases, le groupe de travail, qui a eu connaissance des études prospectives remarquables conduites parallèlement sur le thème de l'énergie par différentes instances a émis les recommandations suivantes à partir d'analyses multicritères combinant objectifs et perspectives de faisabilité :

**La priorité des priorités doit être accordée à la recherche sur l'efficacité énergétique dans les trois domaines d'utilisation de l'énergie que sont les transports, l'habitat/tertiaire et l'industrie.** Certaines évaluations permettent de penser qu'en France la moitié de la réduction recherchée (facteur 3 à 5) peut être atteinte par cette voie si elle est suivie avec détermination et continuité.

Compte-tenu de son potentiel de recherche et de production dans ces domaines, la France peut jouer un rôle de leader ou de co-leader dans ces domaines.

8

Elle a déjà organisé avec un succès reconnu sa R & D dans le domaine des transports terrestres dans le cadre du Prédit (Programme Recherche et Développement, Innovation pour les Transports). Le groupe recommande d'organiser de façon similaire, avec l'appui de l'Adème, la R & D sur l'efficacité énergétique dans l'habitat/tertiaire et l'industrie, de façon à mobiliser les acteurs, publics et privés, à orienter les programmes et à susciter les financements nécessaires.

Le nouveau dispositif de fondations et le système « Eureka » amélioré par l'intervention de l'Europe devraient être utilisés pour renforcer l'aide à la recherche industrielle et accroître ainsi sensiblement l'effort de recherche dans l'habitat/tertiaire et l'industrie.

Le CNRS, en liaison avec les Universités, mais aussi le CEA et l'IFP, devraient prendre en compte cette priorité et redéployer progressivement une partie croissante de leurs capacités humaines et financières à cette fin.

**En ce qui concerne l'offre d'énergie, le groupe recommande pour cette première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle, au moins, de miser sur un mix énergétique combinant nucléaire, fossiles et renouvelables.**

En effet, même dans une perspective optimiste de maîtrise de l'énergie dans les usages et de mise en œuvre de la séquestration sur les sources concentrées de CO<sub>2</sub>, le groupe estime que, dans l'état actuel des connaissances, ce serait un pari technologique très risqué de miser sur la seule association fossiles-renouvelables pour répondre à la demande à des coûts compétitifs, tout en réduisant suffisamment les émissions de CO<sub>2</sub> à l'horizon 2050.

Cette constatation, étayée par l'étude de nombreux scénarii, conduit à recommander une R & D visant à consolider nos acquis dans le nucléaire, tout particulièrement en ce qui concerne les facteurs d'acceptabilité sociale (sécurité, devenir des déchets nucléaires) au travers notamment des centrales de troisième et quatrième génération et dans les énergies fossiles avec la séquestration (capture, transport et stockage du CO<sub>2</sub>), et à les renforcer très sensiblement sur les renouvelables en donnant une priorité au développement de carburants de synthèse produits à partir de la biomasse. L'effort sur ce dernier thème doit être accru.

Le groupe considère, en effet, que les carburants de synthèse issus de la biomasse, dont la production peut faire appel à des procédés chimiques ou biologiques et être le cas échéant combinée avec la séquestration, pourraient apporter une réponse partielle à la demande de carburants liquides dans les transports, en attendant une éventuelle généralisation d'une solution hydrogène - pile à combustible, qui ne peut être envisagée qu'à long terme et dont l'acceptabilité dans les transports n'est pas avérée.

Dans les trois domaines évoqués ci-dessus (facteurs d'acceptabilité sociale du nucléaire, séquestration, carburants de synthèse), la France peut avoir l'ambition d'être un leader ou un co-leader. Mais elle ne peut se désintéresser d'un ensemble de recherches diversifiées dont ses centres publics de recherche et les laboratoires privés doivent être des partenaires importants, notamment au niveau européen.

C'est le cas bien sûr de l'hydrogène et de la pile à combustible, du photovoltaïque, de la production de carburants liquides à partir d'énergies fossiles et du stockage de l'électricité, sujets qui méritent sûrement des moyens accrus, mais aussi de la fusion, de l'éolien off-shore, de l'exploration-production,...

**La conduite au niveau français d'un projet d'une telle ampleur et d'une telle durée requiert une maîtrise d'ouvrage sensiblement renforcée, agissant dans un cadre plus interministériel** pour assurer la cohérence entre les politiques de l'énergie et de l'environnement d'une part, et la programmation de la recherche d'autre part, et disposant, grâce à l'observatoire de l'énergie, de données plus fiables sur les stratégies des grands pays industrialisés et sur les moyens de leur mise en œuvre.

**Cette maîtrise d'ouvrage doit disposer des moyens humains et financiers nécessaires pour assurer, avec l'appui de l'Adème en ce qui concerne principalement l'efficacité énergétique, la préparation des programmes, leur suivi, leur valorisation et les ajustements qui ne manqueront pas d'être nécessaires sur une aussi longue période.**

La Lolf constitue une opportunité pour la mise en place d'une telle maîtrise d'ouvrage sous réserve que le programme R & D dans l'énergie ne soit pas lui-même arbitrairement subdivisé.

Enfin le groupe a souhaité que la France prenne en compte dans cette recherche les enjeux du développement, les pays du nord et du sud ayant des approches diversifiées mais largement solidaires pour l'atteinte de l'objectif global.

## Recommandations

### Priorités

1. Accorder la priorité à la R & D pour la maîtrise de l'énergie (amélioration de l'efficacité énergétique et bilan carbone) dans les trois grands usages de l'énergie (transport, habitat/tertiaire, industrie). Accroître sensiblement les dotations publiques et privées pour l'habitat/tertiaire et l'industrie.

2. Pour l'offre d'énergie, accorder une priorité :

- Pour les renouvelables : carburants de synthèse issus de la biomasse
- Pour les fossiles : séquestration
- Pour le nucléaire : sûreté, déchets, génération 4

**La France doit pouvoir jouer un rôle de leader (ou co-leader) sur ces thèmes. Les dotations devront être accrues sur les deux premiers thèmes, en partie par redéploiement.**

3. La France doit se fixer pour objectif d'être un partenaire important dans les programmes de recherche concernant hydrogène et pile à combustible, photovoltaïque, réseaux et stockage de l'électricité, production de carburants liquides à partir d'énergie fossile et géothermie profonde, sujets pour lesquels l'effort doit être accru, ainsi qu'à la fusion, l'éolien off-shore, l'exploitation-production des énergies fossiles.

### Organisation

4. La maîtrise d'ouvrage publique de la R & D dans l'énergie doit être sensiblement renforcée pour faire face aux nouveaux enjeux et devra s'exercer dans un cadre plus interministériel. Sans compromettre la stabilité des établissements publics de recherche, elle devra disposer de crédits incitatifs en croissance pour infléchir la recherche de ces organismes vers les programmes prioritaires.

5. Améliorer sensiblement notre connaissance des stratégies des autres pays industriels et des moyens de mise en œuvre (dépenses publiques et privées, mécanismes d'incitation, ...). Confier cette mission à l'Observatoire de l'énergie.

6. Recentrer l'Adème sur sa fonction de maîtrise d'ouvrage déléguée (agence d'objectifs) pour la R & D de maîtrise de l'énergie dans les usages (efficacité énergétique et bilan carbone).

7. Pour l'habitat/tertiaire, les principaux secteurs industriels concernés et éventuellement l'agriculture, organiser la fixation des objectifs, la programmation de la R & D et l'évaluation dans le cadre de réseaux inspirés du réseau Prédit fonctionnant pour les transports terrestres.

8. Des fondations de recherche en énergie bénéficiant du nouveau régime fiscal devront être créées afin de dynamiser la recherche des entreprises dans les secteurs qu'elles estiment prioritaires et en partenariat avec les établissements publics de recherche.

9. Le redéploiement déjà engagé par plusieurs organismes de recherche vers l'efficacité énergétique et les énergies à faible contenu en carbone sera poursuivi, après un examen des priorités de recherche sous l'égide des ministères en charge de la recherche, de l'énergie et de l'environnement.

10. Un examen précis des recherches effectuées par le CNRS, en partenariat avec les universités devra être réalisé, afin d'être en mesure d'orienter davantage ces recherches vers les programmes prioritaires identifiés.

### **Partenariat européen**

11. La France proposera à l'Europe d'affirmer son leadership pour la conduite des recherches sur la fusion, l'hydrogène et la pile à combustibles, la séquestration et, d'une manière appropriée, les grands réseaux électriques.

12. La France lancera un programme « hydrogène et pile à combustible » et un programme « séquestration » dans le cadre des dispositifs pilotés par l'Europe.

13. La France proposera à l'Europe de soutenir financièrement les programmes de recherche consacrés à la maîtrise de l'énergie bénéficiant du label « Eureka » en complément des dotations publiques nationales.

14. La France proposera pour le 7<sup>e</sup> PCRD l'affichage d'une priorité consacrée à l'énergie (sous contrainte effet de serre) et la gestion de cette priorité par une seule direction générale.

### **Coopération**

15. La France prendra en compte dans ses programmes de R & D les besoins spécifiques des pays du sud et les associera à certains de ses programmes.



---

# Sommaire

## Constats

Le changement climatique  
L'explosion de la demande mondiale en énergie  
Répondre à la demande énergétique  
Faire face au changement climatique  
Un défi considérable dans le contexte français  
La politique des États-Unis et du Japon  
Les investissements européens  
dans la recherche sur les NTE  
Les investissements de la recherche publique en France  
Les investissements de la recherche privée en France

## Priorités

La méthode  
Les conclusions générales  
Les conclusions pour la France

## Recommandations

La programmation de la recherche :  
dégager des priorités de recherche  
Les moyens de programmation  
Pilotage de la R & D en France  
Conduite de la R & D en France  
Le rôle de l'Europe  
La contribution au développement



# Constats

---



## **Premier constat: l'augmentation et les inconvénients des émissions de gaz à effet de serre constituent désormais des faits avérés.**

Même si les opinions divergent sur les moyens de les combattre, ce constat est désormais celui de la communauté internationale. Il n'est pas inutile de rappeler la problématique correspondante.

Cela fait environ un quart de siècle que certains scientifiques alertent les responsables politiques sur les risques que fait courir sur le climat l'accumulation de certains gaz dit « à effet de serre ». Depuis dix ans, c'est l'ensemble de la communauté scientifique qui s'inquiète et presse les politiques d'agir.

Parmi ces gaz, deux sont directement liés à l'énergie : le méthane (CH<sub>4</sub>) et le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). Le premier accompagne l'extraction du charbon et peut aussi s'échapper au cours de la récupération et du transport du gaz naturel. Le second est produit lors de la combustion de tous les combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon).

Les rejets de CO<sub>2</sub> sont environ deux fois plus importants pour le charbon que pour le gaz naturel, ceux liés au pétrole se situant entre les deux <sup>(3)</sup>. Globalement, avec la répartition actuelle des consommations de combustible fossiles (environ 25 % chacun pour le gaz et le charbon et 40 % pour le pétrole), la combustion d'une tep conduit au rejet d'un peu moins d'une tonne de carbone (0,9 tC) sous forme de CO<sub>2</sub>. Ainsi, pour 7,5 Gtep de combustibles fossiles consommés en 2000, les rejets mondiaux ont été de 6,5 GtC.

Ces quantités de CO<sub>2</sub> liées aux activités humaines constituent une faible part de l'ensemble du cycle du carbone mais il semble bien que les puits naturels de CO<sub>2</sub> que sont les sols, les arbres et les océans ne soient capables de résorber que 3 GtC par an, soit environ la moitié des émissions anthropogéniques. Il en résulte une accumulation de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, qui s'établit actuellement à plus de 3 GtC par an : la teneur actuelle de CO<sub>2</sub> est de 360 ppmv (partie par million en volume), à comparer à 280 ppmv avant la révolution industrielle et elle augmente à un rythme supérieur à 1ppmv par an.

La durée de vie du gaz carbonique dans l'atmosphère est de l'ordre du siècle. Son accumulation au fil des ans entraîne un échauffement de l'atmosphère et une modification des échanges thermiques entre l'atmosphère et les océans. Depuis 1860, la température moyenne à la surface de la terre a augmenté de 0,6 °C. Le dernier rapport du GIEC <sup>(4)</sup> de février 2001 prévoit que d'ici 2100, cette température devrait encore augmenter entre 1,5 °C et 5,8 °C si les scénarios tendanciels ne sont pas inversés, ce qui représente une augmentation sans précédent dans les dix mille dernières années, qui s'accompagnerait, en particulier, d'une montée du niveau des mers de 20 cm à 1 mètre.

Les conséquences graves et potentiellement irréversibles du niveau actuel des émissions ne sont guère plus contestées : sécheresses, inondations, fonte de la calotte polaire et des glaciers sont autant de modifications que les modèles commencent à cerner à l'échelle

(3) Les valeurs précises dépendent de la façon dont les combustibles sont utilisés et, pour le charbon, du type de charbon.

(4) Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, créé en 1988 par l'organisation météorologique mondiale et le programme des Nations unies pour le développement. Ce groupe a publié trois rapports en 1990, 1995 et 2001.

## Constats

---

des continents, même s'il est plus difficile de les appréhender à l'échelle des zones régionales comme la France. Ces phénomènes climatiques provoqueraient des flux migratoires massifs, de nature à mettre en péril le relatif équilibre géopolitique. Ainsi, ces conséquences sont de nature à contraindre de plus en plus fortement la politique énergétique mondiale.

Ces phénomènes sont complexes et s'étalent sur des décennies, ce qui joue aussi en sens inverse : lorsque nous aurons commencé à réduire les rejets de gaz à effet de serre, il faudra plusieurs générations pour revenir à la situation initiale - sous réserve que les mécanismes soient tous réversibles, ce qui n'est peut être pas le cas.

Le protocole de Kyoto a fixé comme objectif de réduire de 5,2 % les rejets de gaz à effet de serre du monde vers 2010 par rapport à ceux de 1990, ce qui correspond à une réduction de 8 % pour l'Europe et à une stabilité pour la France. La plupart des experts estiment que, pour limiter les effets sur le climat, il faudra aller beaucoup plus loin que les engagements de Kyoto, qui n'apparaissent que comme une première étape. Or, on est loin de respecter ces engagements, puisque entre 1990 et 2000, les pays riches ont augmenté, au lieu de réduire, leurs rejets de 0,5 GtC.

Pour cesser, à l'horizon 2050, d'augmenter la concentration de gaz carbonique présent dans l'atmosphère, il faudrait diviser par deux nos émissions actuelles au niveau planétaire et donc les diviser par un facteur 3 à 5 dans les pays développés.

**C'est sur la base de cet objectif que le groupe a travaillé. Il représente pour les différents secteurs producteurs ou consommateurs d'énergie, pour les entreprises comme pour les citoyens un défi considérable, dont ni l'opinion publique, ni les acteurs économiques, à quelques exceptions près, n'ont réellement pris la mesure à ce jour.**

### **Deuxième constat: la demande d'énergie augmentera fortement jusqu'en 2050, essentiellement dans les pays en développement**

#### **Des scénarios qui prévoient tous une forte croissance de la demande <sup>(5)</sup>, à des degrés divers**

De très nombreux scénarios énergétiques sont élaborés chaque année par des organismes spécialisés dans le domaine de l'énergie comme l'Agence internationale de l'énergie (AIE) ou le conseil mondial de l'énergie (CME), des entreprises (Shell), des laboratoires (CNRS) ou par des personnalités individuelles. Ces scénarios peuvent être prévisionnels, en supposant la continuité des tendances actuelles, ou prospectifs, en prenant en compte des contraintes ou des politiques énergétiques particulières.

L'AIE a réalisé un scénario tendanciel de l'évolution des consommations d'énergie et d'émission de CO<sub>2</sub> dans le monde à l'horizon 2030. A l'horizon de 2030 les émissions de CO<sub>2</sub> dépasseraient déjà les 10 Gt de carbone par an contre 6,5 aujourd'hui, rendant impossible d'envisager une stabilisation des émissions à des niveaux acceptables, l'excès d'émission s'établissant en effet à plus de 6 GtC contre 3 actuellement.

Plusieurs autres scénarios ont été élaborés à un horizon de très long terme (2050 et au delà). Les plus pessimistes esquissent un niveau de demande d'énergie qui atteindrait environ **25 Gtep par an** en 2050 (Shell, CME...) supposant une croissance économique de 3 % par an et une décroissance tendancielle de l'intensité énergétique. Dans de tels scénarios, la part des énergies fossiles représenterait au moins 15 Gtep avec des niveaux d'émission incompatibles avec une perspective de stabilisation des concentrations, les énergies renouvelables représentant de 5 à 8 Gtep et le nucléaire de 1 à 3 Gtep selon les scénarios.

Ces différentes prospectives s'accompagnent de scénarios alternatifs plus soutenables, dans lesquels le niveau de la demande mondiale d'énergie serait contenue dans une fourchette de **15 à 20 Gtep** voire inférieure (scénarios C2 du CME, de Shell, de P.R. Bauquis...). Un objectif de stabilisation des concentrations en CO<sub>2</sub> à un niveau de l'ordre de 450 ppm conduirait à limiter le niveau global des émissions à une valeur de l'ordre de 6 Gt de carbone vers 2050, ce qui correspond à un recours aux combustibles fossiles ne dépassant pas 7 Gtep - sauf solution crédible et fiable de stockage du CO<sub>2</sub> dans des conditions de coût et de sécurité acceptables.

#### **Répartition géographique de la demande d'énergie**

Les besoins énergétiques dans les pays de l'OCDE sont annoncés en faible croissance dans les scénarios tendanciels, certains scénarios de « sobriété » énergétique proposant même une baisse des besoins. À l'inverse, les besoins énergétiques sont susceptibles de croître très fortement dans les pays en développement: de près de 3,5 Gtep en 2000 (dont 0,9 Gtep de biomasse traditionnelle), la consommation énergétique étant susceptible de doubler en 2020 et quadrupler en 2050 pour ces pays.

<sup>(5)</sup> 10,5 Gtep actuellement (dont 7,5 Gtep d'énergie fossile)

# Constats

---

## **Le poids des secteurs**

Dans tous les scénarios, le poids de l'industrie dans la demande finale continue à décroître. La valeur ajoutée du secteur continuant à croître, c'est essentiellement le résultat de progrès continus de son efficacité énergétique.

En revanche les tendances de la demande des secteurs résidentiel/tertiaire et des transports sont à la hausse, avec, très vraisemblablement une croissance plus forte dans le secteur des transports.

Enfin, à l'échelle mondiale, comme à l'échelle européenne, le secteur de la production d'électricité contribue de façon importante aux émissions de CO<sub>2</sub>, alors qu'en France, où 78 % de l'électricité est produite à partir d'énergie nucléaire et 14 % à partir d'énergie hydraulique, sa part est faible.

## **Conclusion**

**Les scénarios pour la demande d'énergie en 2050 vont de 15 à 25 Gtep. L'enseignement majeur est l'écart très important entre les scénarios extrêmes, qui, en 2050, dépasse la consommation énergétique mondiale d'aujourd'hui. Les images proposées diffèrent essentiellement en raison de l'importance attachée à la maîtrise de la demande, qui apparaît comme une marge de manœuvre d'action fondamentale.**

**Il faudra en effet être en mesure, au plan mondial, de répondre à cette demande à des conditions économiques acceptables, dans le respect de l'environnement.**

### **Troisième constat : jusqu'en 2050, l'offre en énergies fossiles peut vraisemblablement continuer de satisfaire la demande, ce qui aurait de graves conséquences sur le climat**

#### **La première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle ne devrait pas connaître de pénurie de ressources fossiles**

Pour faire face à la demande actuelle, six grandes catégories d'énergies primaires sont utilisées : le pétrole qui répond à 33 % des besoins, le charbon à 20 %, le gaz à 20 %, le nucléaire à 6,5 %, l'hydraulique à 6,5 % et les autres énergies renouvelables dont le bois et la petite hydraulique à 14 %.

L'analyse présentée en annexe III montre que les potentiels qu'offrent le charbon, le gaz et dans une moindre mesure le pétrole au cours de la première moitié du vingt et unième siècle sont suffisants pour satisfaire aux besoins prévisibles sur la base des technologies et des connaissances actuelles, même si leur répartition géographique peut faire problème et des mouvements de substitution progressive peuvent se révéler nécessaires.

On peut prévoir l'épuisement des ressources accessibles en pétrole et en gaz dans quelques décennies ; par contre, les ressources en charbon sont de plusieurs milliers de Gtep, ce qui reporte l'échéance à deux cents ou trois cents ans, même si ces ressources ne sont pas toutes accessibles et si la consommation d'énergie mondiale continue d'augmenter de près de 2 % par an jusqu'à doubler, sans compter les ressources considérables de gaz - mais difficilement exploitables - qui existent dans les océans sous forme d'hydrates de méthane.

#### **Conséquence sur les émissions de CO<sub>2</sub>**

Les scénarios d'évolution présentés dans le constat précédent situaient la demande mondiale entre 15 et 25 Gtep. En l'absence de pénurie, cette demande pourra continuer d'être satisfaite en majorité comme aujourd'hui, par des énergies fossiles, ce qui aurait des conséquences dramatiques sur le climat et ne tiendrait guère compte des besoins des générations futures.

Le GIEC a recherché les profils d'émission de CO<sub>2</sub> au cours du XXI<sup>e</sup> siècle qui ont pour résultat une stabilisation des teneurs en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à différents niveaux allant de 350 à 1000 ppm. Dans le scénario à 1000 ppm, la courbe d'émission démarre de 7 GtC en 1990 pour dépasser 14 en 2050, atteindre 15 en 2080 puis décroître jusqu'à 5 GtC en 2100. Or l'évolution spontanée, comme celle que propose le scénario tendanciel présenté en annexe IV pourrait fort bien conduire à des émissions supérieures encore à celles du scénario à 1000 ppm. Rappelons qu'avec une teneur en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de 1000 ppm, l'augmentation de température à l'équilibre serait comprise entre 3,5 et 8,7 °C, ce qui conduirait à des catastrophes, d'origine climatique de très grande ampleur, compte-tenu notamment des effets de seuil.

Il ne faut donc pas compter sur une pénurie des ressources fossiles pour réduire les émissions de gaz carbonique dans la première moitié de ce siècle, même si la production pétrolière cessera vraisemblablement de croître au cours de cette période.

### **Préserver la sécurité des approvisionnements n'est pas suffisant pour lutter contre l'effet de serre**

Traditionnellement, le débat sur l'énergie porte sur l'épuisement des ressources, les risques de ruptures brutales d'approvisionnement pour des causes diverses (accidents, attentats, décisions politiques), les pollutions locales, les risques technologiques (risques d'accident et gestion des déchets nucléaires). Si l'on se limitait à ces questions, les choses seraient assez simples.

Pour faire face au risque de rupture brutale d'approvisionnement en énergie, une première réponse possible est de mieux diversifier nos sources d'approvisionnement - notamment sur les usages quasi captifs tels que le pétrole pour le secteur des transports - en ayant conscience que cette diversification n'assurerait une sécurité relative que si chaque source était surdimensionnée de façon à pourvoir suppléer la défaillance d'une autre source. Une autre façon de faire face aux effets de ces ruptures brutales, lorsqu'elles sont relativement brèves, est d'avoir des stocks stratégiques d'une capacité suffisante permettant d'attendre que la cause de la rupture, quelle qu'elle soit, ait été corrigée par les moyens appropriés.

En revanche, pour faire face au changement climatique, les difficultés sont à la fois plus complexes et d'un autre ordre. Pour limiter la hausse des températures à une fourchette de 1 à 3 °C, il faudrait que le total des émissions sur les siècles à venir soit le tiers seulement des émissions que causerait la combustion des ressources accessibles de gaz, pétrole et charbon. C'est à dire qu'il faut que l'humanité s'interdise de brûler les deux tiers d'une énergie accessible et relativement bon marché, ou bien, si elle n'en brûle même qu'une partie, qu'elle prenne soin de retenir au fond de la terre l'essentiel du gaz carbonique issu de la combustion.

### **La tension sur les ressources fossiles pourrait à terme se conjuguer à la contrainte climatique**

À terme, c'est-à-dire à partir de 2020-2030, des tensions économiques et politiques pourront naître de l'amointrissement des ressources facilement exploitables et de leur concentration dans des zones instables politiquement, ce qui conduira les contraintes liées à la sécurité d'approvisionnement à rejoindre, au moins provisoirement, celles relatives à l'effet de serre.

Cependant, il paraît raisonnable de ne pas miser sur un épuisement précoce des ressources, qui conduirait à une réduction naturelle des émissions et traiter la question de la maîtrise des émissions des gaz à effet de serre comme un problème urgent et grave, avec des moyens adaptés.

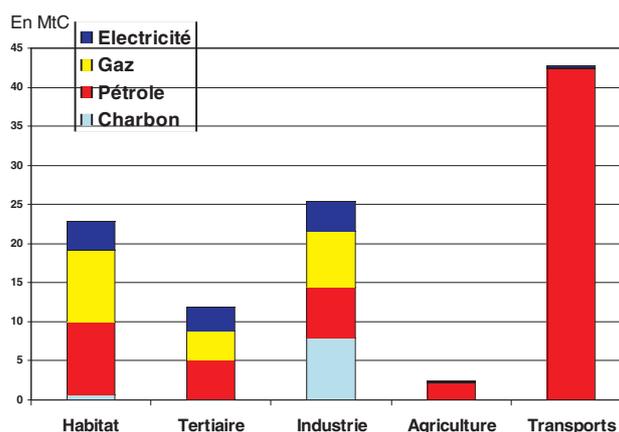
**Sur la base de ces constats, le parti adopté par le groupe de travail est de considérer qu'à l'horizon de 2050, la stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre ne peut être un simple sous-produit ou complément de la politique d'approvisionnement et d'indépendance énergétiques. Certes, même si cette dernière doit demeurer une préoccupation fondamentale des pouvoirs publics, il est de fait que son succès même et l'absence prévisible de pénurie de ressources énergétiques ainsi que la gravité des risques liés à l'effet de serre font que la première ne peut être absorbée par la seconde, ni même lui être subordonnée.**

### Quatrième constat: l'objectif de réduction des émissions de l'ordre d'un facteur 4 en France est un défi considérable pour tous les secteurs, particulièrement pour celui des transports

#### Profil des émissions en 2000 pour la France

Ainsi que le figure le tableau ci-dessous (source : MIES), les consommations d'énergie se sont traduites en 2000 par l'émission de 105,2 MtC qui se ventilent comme suit : 25 MtC pour l'industrie <sup>(6)</sup> (dont 6 MtC pour la sidérurgie), 23 MtC pour le résidentiel, 12 MtC pour le tertiaire, 3 MtC pour l'agriculture et 43 MtC pour les transports <sup>(7)</sup>. Sa décomposition est aussi intéressante par énergie finale : charbon : 9 MtC, pétrole 65 MtC, gaz : 20 MtC et 11 MtC pour la production d'électricité.

Structure des émissions de CO<sub>2</sub> par énergie et par secteur en 2000



Trois conclusions principales peuvent être tirées de cette répartition :

- le poids du pétrole reste lourd puisqu'il induit aujourd'hui près des 2/3 des émissions ;
- les émissions imputables à l'électricité - qui sont prépondérantes dans le bilan mondial - sont par contre très faibles en France, où seulement un dixième de l'électricité <sup>(8)</sup> est produite à partir de combustibles fossiles ;
- les énergies renouvelables n'émettent pas de CO<sub>2</sub> <sup>(9)</sup>, celui produit lors de la combustion de la biomasse étant réabsorbé dans les cultures, nécessaires pour la production de cette biomasse.

#### Rendement global du système énergétique français

Le rendement de notre système énergétique est faible : en 2000, pour satisfaire un besoin d'énergie utile de 86 Mtep, 252 Mtep ont été nécessaires, ce qui correspond à un rende-

<sup>(6)</sup> Pour certaines industries, une partie du carbone utilisé n'est pas dû à des besoins énergétiques, mais à des raisons chimiques : réduction des oxydes de fer par le coke dans la sidérurgie, transformation du carbonate de calcium en ciment dans l'industrie du ciment...

<sup>(7)</sup> Il est à noter que, pour les transports, ce niveau d'émission correspond à la satisfaction des besoins de déplacements individuels mais également à ceux de l'activité économique.

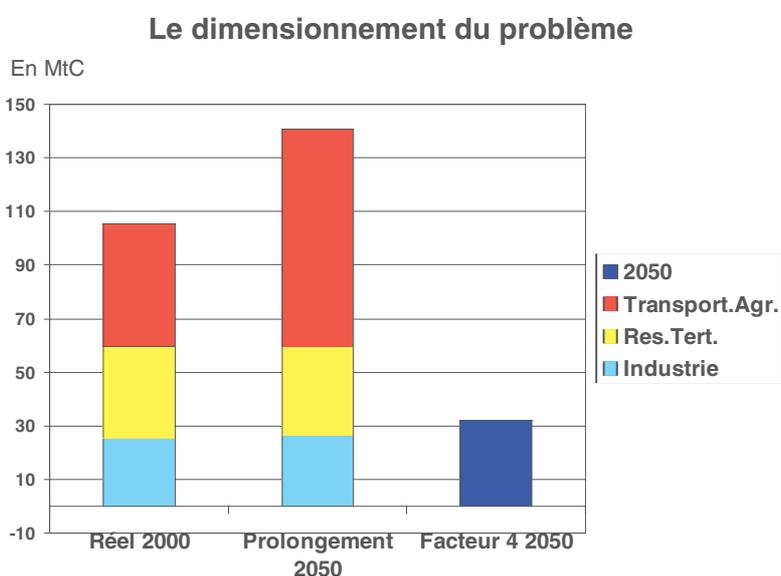
<sup>(8)</sup> La répartition par secteur des émissions de CO<sub>2</sub> dans le monde est la suivante : production électrique : 39 %, transport : 23 %, industrie : 22 %, résidentiel : 10 %, tertiaire : 4 %, agriculture : 2 %.

<sup>(9)</sup> Si l'on ne tient pas compte des émissions liées à l'énergie requise pour les rendre disponibles.

ment de 34 % environ. 166 Mtep ont ainsi été perdues dans les transformations énergétiques (raffinage, production électrique...) et dans les utilisations finales (rendement des appareils électroménagers, des véhicules...). Cette perte de 166 Mtep constitue le premier poste de dépense d'énergie et est donc la cause la plus importante d'émission de CO<sub>2</sub>.

### L'enjeu d'une division par quatre des émissions

La figure suivante (source : MIES) met en regard les émissions de 2000, celles de 2050 dans une hypothèse tendancielle où aucun effort particulier n'est consenti et celles de 2050, dans le cadre d'une division par 4 de ces émissions.



Pour limiter en France les émissions à 32MtC par an en 2050, les efforts à consentir à partir de la situation actuelle sont considérables :

- les usages thermiques des secteurs résidentiel et tertiaire émettent à eux seuls déjà autant que ce qui serait possible en 2050 pour tous les secteurs économiques ;
- le secteur transports émet aujourd'hui 1,3 fois plus que ce qui serait possible pour le pays en 2050 or ses émissions continuent de croître au rythme de 2 % par an absorbant les progrès réalisés dans les autres secteurs ;
- Le secteur électrique émet déjà autant que ce qui lui serait « permis » en 2050.

Dans ce scénario, et en supposant une répartition de la production de carbone par grands secteurs en 2050 identique à celle de 2000, les émissions tendancielle devraient être divisés environ par :

- 2,5 pour l'industrie,
- 3,5 pour le résidentiel/tertiaire
- 7,0 pour les transports,

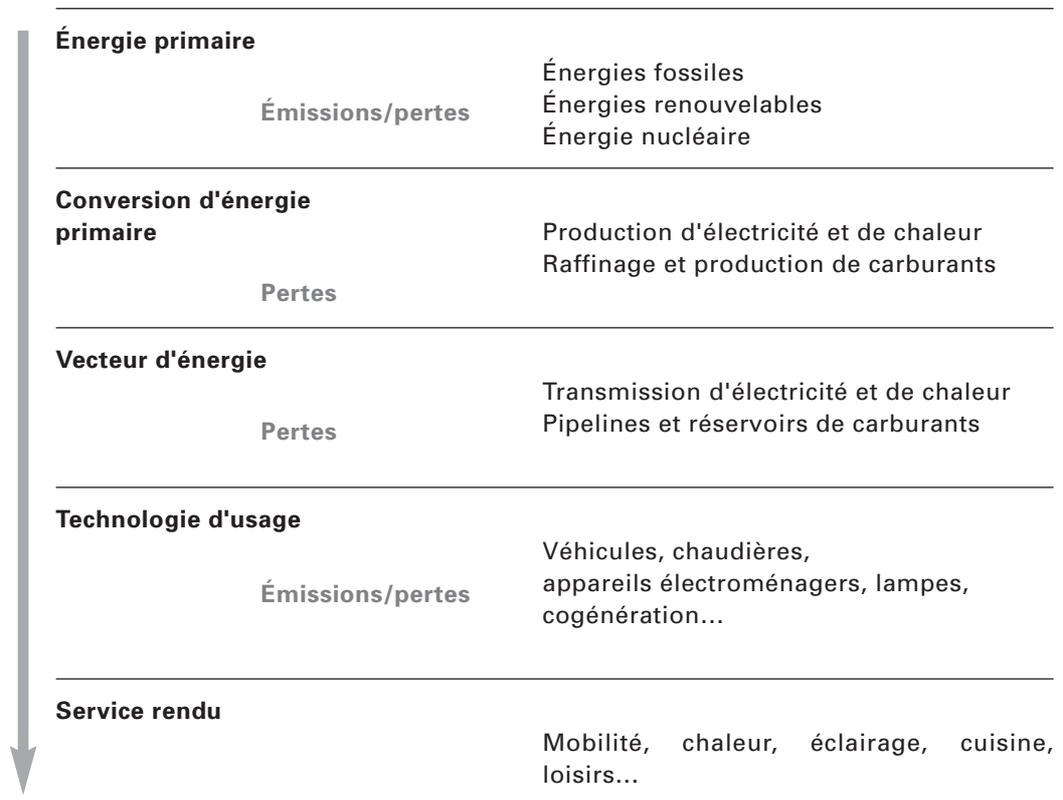
ce qui illustre bien l'effort considérable à consentir dans ce dernier secteur.

## Constats

### Cinquième constat: il n'y a pas de solution miracle, mais un ensemble de voies, qui sont toutes à explorer à des degrés divers

#### Différentes voies de réduction des émissions sont possibles

Il y a trois façons de réduire les émissions de dioxyde de carbone engendrées par les activités humaines, ce qui peut être visualisé simplement à partir du schéma suivant, qui présente la chaîne énergétique allant de la production d'énergie primaire jusqu'au service rendu à l'utilisateur final. Des émissions de CO<sub>2</sub> ou des pertes d'énergie interviennent à tous les stades de cette chaîne.



Il est possible d'agir sur les deux extrémités de la chaîne, du côté de l'offre d'une part, en utilisant des énergies primaires plus pauvres en carbone <sup>(10)</sup> et du côté de la demande, d'autre part, en réduisant les besoins des consommateurs.

Mais il est également efficace d'intervenir sur les différents maillons qui constituent cette chaîne, en diminuant les pertes d'énergie qui caractérisent les transformations successives des énergies primaires jusqu'à leur usage final : ceci revient à utiliser moins d'énergie pour satisfaire les mêmes besoins et donc à émettre moins de GES à chaque stade de la chaîne.

<sup>(10)</sup> Par la suite, les termes « pauvre en carbone » ou « à faible contenu en carbone » désigneront des technologies susceptibles de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

### **Réduction des gaz à effet de serre par une réduction des besoins**

Comme il l'a été expliqué dans le premier constat, maîtriser les besoins des consommateurs d'énergie est inévitable. Compte tenu de l'ampleur des résultats attendus, cette maîtrise devra s'appuyer à la fois sur des mesures organisationnelles (urbanisme, aménagement du territoire, infrastructures de transport, logistique des entreprises, etc.) et sur une évolution des comportements. Le groupe de travail a considéré que ces aspects organisationnels et comportementaux n'entraient pas dans son champ de réflexion, mais qu'ils mériteraient très certainement une réflexion nationale car ils représentent un gisement très important de réduction des émissions ainsi qu'une réponse à d'autres enjeux, tels la saturation des infrastructures ou encore la qualité de la vie en ville.

Les autres moyens de réduction des émissions relèvent en revanche de la mission du groupe, puisqu'ils font appel à un panel de technologies en forte évolution.

### **Réduction des gaz à effet de serre en utilisant moins d'énergie pour satisfaire les mêmes besoins**

Le rendement actuel de nos systèmes énergétiques est très faible : pour satisfaire un besoin d'énergie finale, un niveau d'énergie primaire représentant plus du double est nécessaire.

Si les rendements successifs sont améliorés, les émissions de carbone peuvent donc être réduites à tous les stades de la chaîne, grâce à :

- **une meilleure efficacité de la conversion d'énergies primaires.** L'annexe V, qui présente les rendements actuels et les rendements théoriques de la conversion des différentes énergies primaires en électricité et en chaleur, montre que les marges de progression sont importantes dans ce domaine, surtout en ce qui concerne la production d'électricité ;
- **une meilleure efficacité du transport de l'énergie et l'introduction de nouveaux vecteurs** d'énergie comme l'hydrogène. Des espoirs sont fondés sur ce nouveau vecteur énergétique qui, associé à une pile à combustible, pourrait fournir de l'énergie pour les transports, les applications stationnaires dans le bâtiment et l'industrie sans émission de CO<sub>2</sub>. Mais ce vecteur, controversé par certains, ne peut être développé sans une approche globale intégrant les moyens de production (sauf moyen de séquestration du CO<sub>2</sub>, la production de l'hydrogène ne produit pas de gaz carbonique seulement s'il est fabriqué à partir d'énergie nucléaire ou d'énergies renouvelables) ainsi que les questions liées au transport, au stockage et à la distribution. La généralisation de son usage requiert en outre des investissements considérables. Il ne faut donc pas négliger les progrès qui peuvent être accomplis dans le stockage de l'électricité, comme alternative au vecteur hydrogène ;
- **une meilleure efficacité dans la conception des produits.** Le progrès consiste à réaliser des produits finals ayant les mêmes fonctions, mais avec des conditions de fabrication mettant en œuvre moins d'énergie. Citons à titre d'exemple l'emballage : utiliser moins d'aluminium, de verre, d'acier ou de papier en réduisant les épaisseurs conduit à réduire d'autant la consommation de matériaux et donc l'énergie nécessaire à leur fabrication. Les bétons à hautes performances (BHP), les aciers à haute résistance, permettent d'alléger les constructions : tout se passe alors comme si, dans le produit final, les matériaux utilisés avaient un moindre contenu énergétique ;

● **une meilleure efficacité dans les usages finals**, qui contiennent vraisemblablement les gisements d'efficacité les plus importants. Les progrès dans la maîtrise des consommations finales seront nécessairement progressifs, car ils concernent l'ensemble des consommateurs et les dynamiques de diffusion des nouvelles techniques joueront un rôle important. Mais, à l'horizon de 2050, des avancées très importantes peuvent caractériser chacun des grands secteurs transport, bâtiment, industrie.

### **Réduction des gaz à effet de serre par recours à des énergies primaires pauvres en carbone**

Du côté de l'offre, des substitutions d'énergie à fort contenu carboné par des énergies à contenu carboné plus faible (gaz) ou nul (renouvelables, nucléaire) sont envisageables. Enfin la capture et le stockage du gaz carbonique dans des conditions économiquement supportables constitue la seule option technologique susceptible d'autoriser un usage des ressources fossiles, pour limiter la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à un niveau acceptable tout en préparant d'autres ruptures technologiques.

### **Il n'y a pas de solution miracle...**

Une des grandes caractéristiques de l'avenir énergétique dans le cadre de la lutte contre l'effet de serre est la difficulté à identifier des technologies « gagnantes » au cours des prochaines décennies qui verront un haut niveau d'innovation et d'expérimentation.

Aucun scénario de maîtrise de la demande aussi ambitieux soit-il, aucune source d'énergie primaire (cf. annexe VI), ni aucune option technologique actuellement connue, relative à la demande ou à l'offre, ne peut satisfaire à elle seule l'objectif d'une division par quatre des émissions de gaz à effet de serre dans les pays développés. Il sera nécessaire d'avancer sur tous les fronts : un système énergétique futur à faibles émissions de gaz à effet de serre reposera vraisemblablement sur un mix d'énergies, de vecteurs et de convertisseurs d'énergie, qui revêtira des formes différentes dans les diverses régions du monde.

### **...mais de grandes tendances se dessinent.**

Au sein de la diversité des scénarios, de grandes tendances se dégagent cependant, parmi lesquelles peuvent être cités :

- une « course vers le gaz » en tant qu'énergie de transition, qu'il faudra savoir contrôler pour éviter une trop forte tension sur les prix ;
- une évolution vers des sources décentralisées d'électricité et de chaleur, avec une implication forte sur la gestion de réseaux multisources ;
- un accroissement de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique, plus ou moins important selon les scénarios et avec une disparité croissante selon les régions, couplé à l'importance de disposer de solutions satisfaisantes de stockage de l'énergie et des produits d'émissions ;
- un accroissement parallèle de la part de l'énergie nucléaire dans ce mix, qui traduit un début de reconnaissance de l'intérêt de la production électronucléaire pour lutter contre le changement climatique, même si les réticences pour cette forme d'énergie demeurent importantes en raison des risques réels ou supposés liés aux déchets, à la sûreté et à la prolifération nucléaires.

### **Sixième constat: malgré des positions différentes à l'égard du protocole de Kyoto, les États-Unis et le Japon ont engagé des politiques dynamiques semblables en matière de nouvelles technologies de l'énergie.**

#### **Deux attitudes par rapport à la question du changement climatique qui aboutissent à des résultats similaires**

Les États-Unis n'ont pas ratifié le protocole de Kyoto, qu'ils considèrent trop contraignant pour leur économie, mais ont annoncé récemment des initiatives importantes en matière de R & D sur les nouvelles technologies de l'énergie qui montrent que ce pays prend au sérieux la menace du changement climatique et qui, si elles débouchent sur des applications concrètes, pourraient permettre à terme d'aller bien au-delà de la réduction des émissions prévue par le protocole et renforcer encore la compétitivité des entreprises de ce pays.

Le Japon, qui a ratifié le protocole de Kyoto, est persuadé du bien fondé de la démarche et de la nécessité d'aller au-delà. Poussé par son opinion publique, très sensible aux thèmes environnementaux et persuadée de l'intérêt économique d'investir dans de nouvelles technologies à débouché mondial, le Japon mène une politique ambitieuse de recherche associant secteur public et privé, soutenue par des budgets en augmentation régulière.

#### **Des politiques conduites par des acteurs puissants**

Aux États-Unis, le « Department of Energy » (DOE), ministère de l'énergie doté d'un budget de 23 milliards de dollars (Mds USD) en 2003, est en charge de la recherche sur l'énergie. Environ 12 % de l'effort financier du DOE en matière de R & D est absorbé en interne, le reste étant contractualisé avec les « federally funded research and development centers » FFRDC, les universités et les entreprises.

Au Japon, les grands acteurs de la recherche sont la « new energy and industrial development organization » (NEDO), agence de moyens ayant pour vocation de verser d'importantes subventions aux entreprises japonaises et l'AIST, centre de recherche national. Ces deux entités fonctionnent sous la tutelle du ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI), qui est le maître d'œuvre de la politique énergétique nationale et conduit également ses propres programmes de recherche.

#### **Des budgets de R & D en énergie très importants qui concernent toute la panoplie des technologies**

Ces deux pays arrivent largement en tête en matière de R & D dans le secteur de l'énergie, le budget public des États-Unis atteignant près de 2 Mds€ en 2002 celui du Japon étant estimé à près de 3,5 Md€. Si l'on exclut la recherche nucléaire, qui représente environ 2,5 Md€ au Japon contre 560 millions aux États-Unis, les efforts sont du même ordre de grandeur : 1,4 Md€ pour les États-Unis et 1Md€ pour le Japon.

## Constats

La répartition des deux budgets publics est présentée dans le tableau ci-après. Mentionnons qu'il est très difficile d'obtenir des données fiables en la matière : celles-ci résultent du croisement de plusieurs sources d'information et doivent être considérées comme des ordres de grandeur, sans exclure un risque d'inexactitude :

### Les montants de R & D publiques aux États-Unis et au Japon :

En millions d'euros (2003)	États-Unis	Japon
Nucléaire	565	2 500
<i>Fission</i>	315	
<i>Fusion</i>	250	
Fossiles	500	100
<i>Dont charbon</i>	300	
<i>séquestration</i>	60	
Énergies renouvelables	250	230
Efficacité énergétique	500	500
Hydrogène et pile à combustible	160	200
<b>Total</b>	<b>1 975</b>	<b>3 530</b>
<b>Total hors nucléaire</b>	<b>1 410</b>	<b>1 030</b>

Les deux pays investissent des montants très élevés comparables dans le domaine des énergies renouvelables (250 M€ par an) ainsi que dans celui de l'efficacité énergétique (500 M€ par an) et de l'hydrogène/pile à combustible (200 M€ par an). Le seul secteur qui les différencie nettement est celui des énergies fossiles qui mobilisent aux États-Unis 500 M€ par an contre 100 M€ par an au Japon. Les États-Unis ont dans ce secteur une politique dynamique, compte tenu des très importantes réserves de charbon dont ils disposent. 60 M€ étaient consacrés en 2002 à la séquestration du CO<sub>2</sub>.

### La filière « hydrogène-pile à combustible » est privilégiée par ces deux pays.

En marge du plan Bush pour l'énergie de février 2002, le Président américain a annoncé lors de son discours sur l'état de l'Union (28 janvier 2003) un grand programme national pour promouvoir la transition vers une « économie de l'hydrogène » qui vise principalement à réduire la dépendance énergétique américaine (qui est estimée à 65 % en 2020 sans mesures nouvelles) tout en maîtrisant les émissions de gaz à effet de serre. Le Congrès a d'ores et déjà voté des crédits s'élevant à 1,7 Mds USD sur cinq ans de 2004 à 2008 pour financer ce plan hydrogène qui doit plus particulièrement permettre de réduire le coût de la production d'hydrogène, de maîtriser son stockage et de réduire le coût de la pile à combustible. Le DOE a fait réaliser trois rapports sur l'hydrogène - dont une synthèse a été réalisée par la DREE pour le groupe de travail. Les États-Unis comptent privilégier deux voies de production de l'hydrogène : l'une à partir du charbon avec séquestration du gaz carbonique, l'autre à partir de nucléaire.

Si le Japon promeut la technologie des cellules photovoltaïques, secteur dans lequel il dispose d'une position mondiale forte, il mise également en premier lieu sur la pile à combustible pour réduire sa dépendance énergétique (le Japon importe actuellement 80 % de ses matières premières pour produire son énergie) et respecter ses engagements du protocole de Kyoto.

Le montant annuel actuellement consacré à ces filières est de plus de 200 M€ par an.

### **L'effort de recherche des entreprises et le partenariat public-privé**

Le partenariat public-privé sur les nouvelles énergies paraît plus dynamique au Japon et aux États-Unis qu'en Europe. Les entreprises sont à la fois plus investies à titre individuel et davantage soutenues par la puissance publique, ceci expliquant peut-être cela...

Une comparaison sérieuse des modalités d'aide publique à la recherche industrielle, notamment dans le domaine de l'énergie, ne semble pas disponible. Elle mériterait d'être effectuée rapidement.

La mission économique de Tokyo évalue l'effort de R & D privée en matière d'énergie à 5 milliards d'euros, soit cinq fois le montant de la R & D publique japonaise. Cet effort concerne particulièrement les acteurs du gaz et de l'électricité, qui investissent dans la co-génération, les piles à combustibles, la filière hydrogène, ainsi que les compagnies pétrolières et les constructeurs automobiles sur la filière de l'hydrogène, les piles à combustible embarquées, les carburants propres.

La mission économique de Washington estime que l'effort de R & D des entreprises américaines est de l'ordre de 1 milliard de dollars. Ces investissements interviennent pour partie en partenariat avec le DOE, qui impose généralement que le secteur privé investisse une somme au moins égale à celle apportée par le budget fédéral. Dans les projets les plus innovants, la part de financement publique peut dépasser 70 %. Il faut noter que cette situation confère une attractivité forte pour localiser les centres de R & D aux États-Unis, même pour les entreprises multinationales françaises (cf. Alstom).

Le secteur automobile est particulièrement dynamique dans le développement de la pile à combustible. Beaucoup de grands constructeurs mondiaux ont leurs propres programmes de R & D dans ce domaine, de Nissan à Ford en passant par BMW. Les autorités américaines sont d'autant plus enclines à favoriser la R & D dans le secteur de la pile à combustible que les 3 majors automobiles de Détroit (Ford, GM et DaimlerChrysler dans une moindre mesure) ont accumulé un retard important sur leurs concurrents japonais et européens sur les autres segments technologiques visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre : véhicules électriques et hybrides, injection directe à haute pression (diesel) ou en mélange pauvre (essence), biocarburants...

Parmi les autres initiatives, on retiendra le projet lancé en novembre 2002 et qui regroupe des sociétés telles que Exxon-Mobil, General Electric, Schlumberger ainsi que d'autres partenaires industriels et la prestigieuse université californienne de Stanford et qui vise à identifier les technologies qui permettront de garantir demain un approvisionnement énergétique de l'ensemble de la planète tout en respectant au mieux l'environnement. Ce projet est vraisemblablement la plus importante initiative privée en la matière

avec un budget estimé pour l'instant à environ 200 millions USD sur les 10 prochaines années. Exxon Mobil, première compagnie pétrolière mondiale, s'est d'ores et déjà engagée à hauteur de 100 millions USD, General Electric pour 50 millions USD et Schlumberger pour 25 millions USD. Les montants combinés mis en jeu sont équivalents à l'ensemble des fonds privés reçus par Stanford pour ses activités de R & D, tous domaines confondus, au cours des dix dernières années. Ce projet intitulé Global Climate and Energy Project (GCEP) sera conduit principalement par des ingénieurs et des scientifiques de Stanford, mais s'appuiera aussi sur les compétences d'autres institutions aux États-Unis, en Europe et au Japon.

**Les efforts consentis dans la filière « hydrogène » par les États-Unis et le Japon, pourraient être de nature à conférer à ces pays un avantage compétitif de long terme dans ce domaine.**

Cette conclusion a été transmise par la direction des Relations économiques extérieures qui a réalisé pour le groupe de travail NTE plusieurs études sur les nouvelles technologies dans les pays de l'OCDE. Nous citons ci-dessous les deux paragraphes qui suivent cette conclusion :

« Les mesures récemment préconisées par le président Bush et l'administration américaine (piles à combustible, déclaration de janvier 2002 ; filière hydrogène, printemps 2003) emboîtent le pas aux directions définies par les autorités japonaises. De la communauté de vue des deux premières puissances scientifiques et technologiques découlera très probablement la définition de la politique énergétique mondiale à moyen et long terme.

Parallèlement aux orientations prises par les États-Unis et le Japon dans le domaine du nucléaire pour réduire leur dépendance énergétique et lutter contre les émissions de gaz à effet de serre, les choix technologiques réalisés en faveur de la filière " hydrogène " devraient permettre à ces pays de conforter, à moyen et long terme leur avance technologique dans ce domaine et de remporter, dans une dizaine d'années, de nombreux marchés dans un secteur qu'ils jugent porteur. »

Citons également une appréciation de la stratégie des États-Unis, sur l'ensemble des nouvelles technologies cette fois, transmise récemment au président du groupe de travail par le Président d'une entreprise française de l'énergie :

« Les efforts déployés par les États-Unis dans le domaine de la conversion d'énergies primaires en électricité dans le respect de l'environnement sont l'illustration de leur volonté de créer à moyen terme un fossé technologique à leur avantage.

On peut aisément imaginer que l'objectif de cette stratégie est de maîtriser ces technologies, puis d'imposer au reste du monde des contraintes pouvant aller bien au-delà de celles définies à Kyoto, créant par là même un vaste marché pour leur industrie.

L'enjeu pour la France et pour l'Europe est de prendre conscience des enjeux techniques, environnementaux et commerciaux auxquels nous serions confrontés si les américains atteignaient cet objectif ».

### **Septième constat: les initiatives de l'Union européenne et des pays qui la constituent en faveur des nouvelles technologies de l'énergie manquent surtout de cohérence et d'efficacité.**

#### **Des points forts**

La R & D en Europe a les moyens tant humains que financiers de rivaliser avec celle des États-Unis et du Japon <sup>(11)</sup>.

En effet, les efforts financiers engagés par les **États membres de l'Union européenne** en matière de recherche sur l'énergie hors nucléaire (760 M€) et ceux du PCRD (800 M€ sur 4 ans pour le 6<sup>e</sup> PCRD) atteignent un total financier d'un peu plus de 950 M€ par an, ce qui, tout en étant inférieur aux montants investis par les États-Unis (1 400 M€) et le Japon (1 000 M€), représente un montant significatif qui permet de soutenir la comparaison. Le 6<sup>e</sup> PCRD consacre effectivement 800 M€ sur 4 ans à l'énergie, 400 pour la recherche à court et moyen long terme, pilotée par la DG TREN et 400 pour la recherche à moyen et long terme pilotée par la DG Recherche.

Ces efforts financiers mobilisent d'autre part des structures de recherche de haut niveau, internationalement reconnues. Les « réseaux d'excellence », mis en œuvre dans le cadre du 6<sup>e</sup> PCRD ont permis un premier rapprochement des potentiels de recherche des différents pays.

L'activité de chaque pays et de l'Union est forte, comme en témoignent les 300 projets retenus dans le cadre du 5<sup>e</sup> PCRD, sur 750 projets soumis.

#### **Des faiblesses structurelles**

Il semble en premier lieu que l'articulation entre les recherches nationales et celles effectuées dans le cadre du PCRD soit insuffisante. Dans un contexte de recul des budgets nationaux, les programmes communautaires ont pu être sollicités davantage comme des compléments que comme la façon de conduire en commun des grands programmes prioritaires.

En second lieu, malgré la tentative du 6<sup>e</sup> PCRD de lancer des « projets intégrés » sensés atteindre la taille critique, les investissements de l'Union paraissent encore relativement dispersés. Il ne faut pas nier qu'il est difficile de faire fonctionner un espace européen de la recherche qui réunit des pays favorables au nucléaire et d'autres plus réservés sur cette forme de production d'énergie. Le coût de gestion des projets s'élèverait, selon certaines estimations, à près de 50 % du budget de ces projets, ce qui serait considérable.

En l'état, la Commission n'a qu'une vision partielle des efforts de recherche en matière d'énergie consentis par les différents pays européens <sup>(12)</sup> et elle-même ne paraît pas en mesure de restituer des données chiffrées suffisamment fiables par grand thème dans ce secteur.

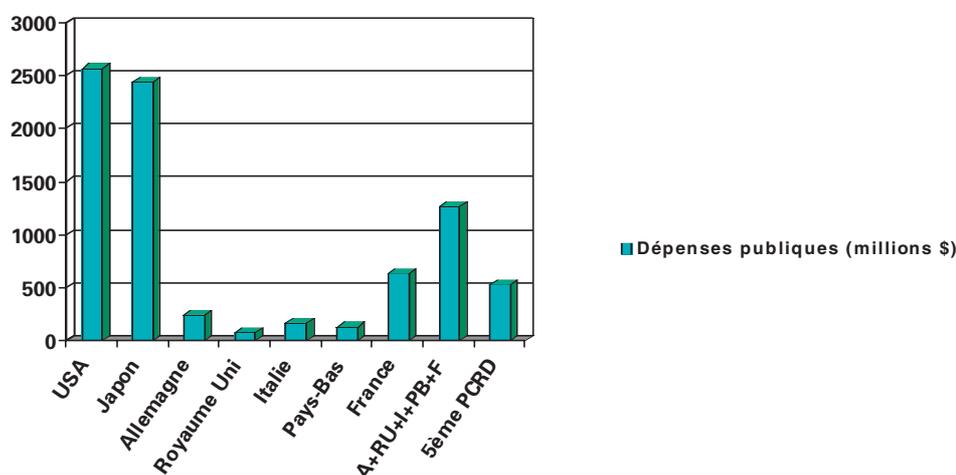
<sup>(11)</sup> cf. Tableau de l'annexe VII (données AIE 1999).

<sup>(12)</sup> Une initiative de la DG recherche, en coordination avec les États membres, tente actuellement de remédier à ce manque

## Constats

Il semble également que les obligations de publicité ne permettent pas de protéger suffisamment la propriété industrielle indispensable à la réussite commerciale de l'innovation.

Enfin, et surtout, l'effort financier global s'il n'est pas négligeable résulte de l'addition des efforts des pays et de l'Union, ce qui, en l'absence d'une suffisante coordination, conduit nécessairement à un manque d'efficacité, par absence d'économie d'échelle. La planche présentée ci-après présente une comparaison des efforts de R & D <sup>(13)</sup> dans l'énergie américains et japonais avec ceux d'un panel de pays européens (Allemagne, France, Grande-Bretagne, Italie, Pays-Bas) et du 5<sup>e</sup> PCRD, qui témoigne de l'éclatement structurel des efforts de l'Europe <sup>(14)</sup>.



### Les nouvelles technologies de l'énergie

Ces faiblesses sont particulièrement pénalisantes s'agissant des nouvelles technologies de l'énergie qui nécessitent un infléchissement des politiques antérieures, qui n'a pas encore été réalisé par l'Europe.

En ce qui concerne les points d'application de l'effort européen, l'hydrogène mobilise l'attention de l'Union européenne. Dans le 5<sup>e</sup> PCRD, € 120 millions avaient été consacrés à la recherche sur l'hydrogène et les piles à combustible.

Dans le 6<sup>e</sup> PCRD, les moyens consacrés aux piles à combustible, à leurs applications et aux technologies de l'hydrogène seront fortement augmentés par rapport au programme précédent <sup>(15)</sup>.

La séquestration géologique du CO<sub>2</sub> a aussi fait l'objet de programmes de recherche et démonstration dans les programmes cadres successifs, ce qui a permis à des opérateurs de recherche français (BRGM, et plus récemment IFP) de se placer sur ces sujets.

<sup>(13)</sup> Les montants de R & D publique sont donnés pour tous les pays. En revanche, dans le cadre de cette étude, le montant de la R & D privée n'a pas pu être déterminé pour la France.

<sup>(14)</sup> Source : rapport réalisé pour le compte du DOE.

<sup>(15)</sup> Cf. En annexe VIII une analyse des résultats du premier appel d'offres du 6<sup>e</sup> PCRD

En revanche le charbon propre et les turbines à gaz de nouvelle génération sont largement ignorés alors que, tant pour les besoins propres de l'Union (par exemple l'Allemagne pour le charbon) que pour son rôle de puissance exportatrice de technologies et de systèmes (notamment, mais pas seulement, en direction de l'Europe centrale et orientale, de l'Inde, de la Chine, de l'Amérique du Sud), ces thèmes, parmi d'autres, paraissent importants.

De leur côté, les pays européens consacrent seulement chacun quelques dizaines de millions d'euros à la recherche dans les technologies autres que nucléaire et énergies fossiles, avec toutefois un effort beaucoup plus marqué qu'en France dans plusieurs pays sur les renouvelables (géothermie en particulier) et la séquestration géologique (Allemagne, Pays Bas, pays scandinaves...).

Pour atteindre la taille critique sur ces questions et être en mesure de dialoguer avec les autres puissances économiques, il conviendrait d'estimer puis de répartir et de coordonner les efforts à conduire par les pays et par l'Union.

### Évaluation

Une comparaison pertinente entre l'effort consenti par l'Union européenne d'une part et les États-Unis et le Japon d'autre part en faveur des nouvelles technologies de l'énergie par secteur de recherche est difficile en l'état actuel des données disponibles. En effet les dépenses engagées au niveau de l'Union et des États membres n'ont pas jusqu'à ce jour fait l'objet d'une consolidation accessible.

La question est donc sans doute d'abord celle de la cohérence et l'efficacité de l'effort consenti. Le concept de plate-forme technologique conçu comme un moyen de focaliser l'action et les moyens européens sur les enjeux essentiels par une approche intégrant les initiatives des États membres devrait dans cette optique être mis en œuvre de manière urgente et aussi simple que possible avant que les fonds du 6<sup>e</sup> PCRD ne soient totalement attribués.

L'Europe ne manque pas de moyens, mais ceux-ci devraient sans doute être accrus pour faire jeu égal avec les USA et le Japon. De plus, elle ne dispose pas d'un DOE du type américain ou d'un METI de type japonais, ni d'une organisation aussi compacte. Il lui est donc difficile d'avoir les visions, les politiques et l'efficacité correspondantes.

### **Huitième constat: l'effort public français de recherche-développement dans les technologies de l'énergie est substantiel, mais ne prend pas encore suffisamment en compte, dans son organisation et ses moyens, l'impératif de réduction des émissions de gaz à effet de serre.**

À la suite du premier choc pétrolier, la France avait su organiser et mettre en œuvre avec succès un effort national intégré et efficace pour assurer l'approvisionnement et l'indépendance énergétiques du pays.

La prise de conscience de l'impératif de réduction des émissions de gaz à effet de serre est sans doute à la fois trop récente et moins profonde de sorte que l'organisation de l'action publique ne l'a pas encore assez pris en compte, que les instruments de pilotage indispensables sont encore inadaptés et que la réorientation des moyens financiers qu'il impose a à peine débuté.

#### **Une organisation fragmentée**

Trois ministères, le ministère de la Recherche, le ministère de l'Industrie et le ministère de l'Écologie et du Développement durable, animent la recherche en matière d'énergie, via la tutelle d'organismes rattachés, de réseaux et de structures décentralisées. Au sein du ministère de la Recherche, c'est la direction de la Technologie qui pilote la politique de recherche en matière d'énergie et anime les réseaux de la recherche et de l'innovation technologiques (RRIT). Au ministère de l'Industrie, deux directions sont concernées par la recherche sur les énergies: la direction générale de l'Industrie, des Technologies de l'information et des Postes (DIGITIP) et la direction générale des Énergies et des Matières premières (DGEMP), qui définit et met en œuvre la politique énergétique nationale. Le ministère de l'Écologie comprend deux directions, la direction de la Prévention de la Pollution et des Risques (DPPR), ainsi que la direction des Études économiques et de l'Évaluation environnementale (D4E), plus particulièrement intéressées par les énergies renouvelables et la maîtrise de l'énergie.

Le ministère de la Recherche répartit l'essentiel des crédits de la recherche en énergie par l'intermédiaire du Budget civil de Recherche et Développement (BCRD). Au sein de ce budget, le fond de la recherche technologique (FRT) est mobilisé au travers des réseaux de recherche et d'innovation technologiques, tandis que le Réseau de recherches technologiques pétrolières et gazières s'attache à soutenir la recherche fédérative des acteurs de la recherche pétrolière et para-pétrolière. Des crédits de montants nettement plus faibles - à l'exception notable de la dotation industrie pour le CEA - sont alloués par le ministère de l'industrie et le ministère de l'écologie aux établissements dont ils ont la tutelle ainsi qu'à des réseaux ou programmes transversaux.

L'Adème, établissement public sous la tutelle de ces trois ministères, joue un rôle d'animation de la recherche dans les domaines de la maîtrise des consommations, du développement des énergies renouvelables et des nouvelles technologies (hydrogène, pile à combustible, séquestration du CO<sub>2</sub>). Elle attribue à cet effet des crédits incitatifs provenant des dotations budgétaires de ses trois ministères de tutelle.

Par ailleurs, trois établissements publics principaux, le centre national de recherche scientifique (CNRS) en partenariat avec les Universités, le commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'Institut Français du pétrole (IFP) sont impliqués dans la recherche en matière d'énergie. Le CNRS, centre de recherche fondamentale, sous la tutelle du ministère de la recherche, a structuré en 2002 un programme interdisciplinaire appelé « énergie », par identification de programmes et compétences internes. Le CEA, centre de recherche sur l'énergie nucléaire, sous double tutelle recherche et industrie, a développé depuis 2000 une activité de recherche sur les nouvelles technologies de l'énergie. L'IFP, centre de recherche sous tutelle industrie, est spécialisé sur les ressources fossiles, sur les moteurs et les carburants. Ces établissements reçoivent des financements provenant directement de l'État sous forme de dotations budgétaires ou de crédits incitatifs (Adème, FRT), ainsi que des crédits issus de contrats avec des industriels.

De nombreux autres organismes, établissements publics à caractère industriel et commercial ou établissements publics à caractère scientifique, relevant du BCRD et ayant des tutelles diverses, conduisent des recherches sur des thèmes énergétiques particulièrement focalisés, ce qui a été récemment confirmé par les réponses au questionnaire adressé par le ministère de la recherche. Citons le bureau de recherche géologique et minière (BRGM) sur la séquestration géologique du carbone et sur la géothermie, l'institut national de la recherche agronomique (INRA) sur la biomasse, l'institut national de la recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS) sur les transports, le centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) sur le bâtiment, le Cemagref sur la chaîne du froid, le Cirad sur la forestation tropicale, les écoles des mines sur l'économie et les technologies énergétiques,...

Encore faudrait-il pour être complet citer d'autres acteurs publics qui à un titre ou un autre contribuent à la recherche sur les technologies de l'énergie, les grandes écoles, les universités et, bien entendu, EDF et GDF qui ont conduit des recherches d'intérêt général dans le cadre de leurs missions d'établissements publics. Les régions soutiennent, à travers les contrats de plan État Région, le développement de capacité de recherche dans leur ressort.

### **Des initiatives de coordination**

La recherche publique en matière d'énergie est donc répartie entre un grand nombre d'acteurs aux missions très diverses, ce qui peut être une source de dynamisme, mais peut aussi constituer un frein à l'efficacité de la lutte contre l'effet de serre, plusieurs organismes différents travaillant sur des sujets voisins, sans concertation suffisante et sans exclure d'ailleurs une certaine forme de compétition.

Deux réponses à ce problème ont vu le jour avec la mise en place des réseaux de recherche et d'innovation technologiques et la tentative - encore en gestation - de créer une grande plate-forme de recherche sur des thèmes communs à plusieurs organismes. Les deux plus importants réseaux sont le Prédit et le réseau « pile à combustible » (PACO).

### **Les RRIT en matière d'énergie**

Les réseaux de recherche et d'innovation technologiques constituent un soutien à la politique de l'innovation que conduit le ministère de la Recherche <sup>(16)</sup>. Ils ont pour but de

---

<sup>(16)</sup> La création des réseaux a été annoncée par le Premier ministre lors des Assises de l'innovation en 1998 et confirmée par le Comité interministériel de la recherche scientifique et technologique (CIRST) en 1998 et 1999.

favoriser le couplage entre la recherche publique et les entreprises, sur des domaines jugés prioritaires où l'effort conduit par les structures habituelles est jugé insuffisant. Deux d'entre eux concernent plus particulièrement le domaine de l'énergie, le Prédit et le Paco.

Le réseau Prédit, qui constitue actuellement, au niveau national, la plate-forme de coopérations et d'actions pour la recherche et le développement dans le domaine des transports terrestres, est le plus ancien des seize réseaux en activité. Le financement total du réseau **Prédit 2** a représenté un investissement total de 747 M€ de 1996 à 2000, ce qui représente un montant annuel de 150 M€. La part du secteur public pour un peu plus de 1300 projets a représenté un montant total de 260 M€ et celui du secteur privé de 487 M€. Le **Prédit 3** (2002-2006) a été lancé le 19 mars 2002. Il mobilise plus de 250 experts issus de la recherche publique, des industries et des collectivités locales.

Le Prédit regroupe les actions des ministères chargés de la Recherche, des Transports, de l'Industrie, de l'Environnement et des deux agences l'Adème et l'ANVAR. Les crédits incitatifs issus du Budget civil de Recherche et Développement Technologique sont de 305 millions d'euros pour les cinq années du programme, dont 40 % environ concernent directement l'énergie et l'effet de serre.

Le réseau Paco est un réseau technologique de R & D coopérative sur les piles à combustibles et leur filière amont (carburant) et aval (usages électricité/chaleur) qui a été créé en juin 1999. Il est piloté par un comité d'orientation d'une vingtaine de membres représentatifs des laboratoires de recherche et des industries concernées par l'utilisation ou la fabrication des piles à combustibles. Il définit les orientations de recherche et développement et évalue les projets de recherche qui lui sont soumis. L'animation scientifique et technique est assurée conjointement par l'Adème et le CEA.

Le financement des projets labellisés est assuré par le ministère de la Recherche (via le FRT), le ministère chargé de l'industrie, l'Adème, occasionnellement l'ANVAR et le ministère chargé des transports. Les crédits incitatifs de l'État sont de l'ordre de 10 M€ par an (dont 3,8 M€ du MR). Une partie des projets est conjointe avec le Prédit. Sur 1999 / 2002, les financements publics mobilisés se sont élevés à 32 millions d'euros.

Au titre de ces actions fédératrices, peuvent être également cités le GIS AGRICE (biocarburants et cultures énergétiques), le réseau « Matériaux et procédés », le réseau « Micro-Nano-Technologies » ou encore le GEIE « Géothermie Profonde ».

### **La plate-forme commune CNRS-CEA-IFP-Adème**

Une autre initiative concernant les nouvelles technologies et la maîtrise de l'énergie, a été lancée en commun en 2001, à la demande du ministère de la Recherche, par l'Adème, le CEA, le CNRS, puis l'IFP, avec pour vocation de fédérer l'ensemble des acteurs nationaux de la recherche au travers d'une grille de programmation stratégique.

Trois objectifs principaux sont proposés : promotion d'un « mix » énergétique à moindre contenu carbone (énergies renouvelables, filières de l'hydrogène, gestion et stockage de l'énergie) ; réduction des émissions de gaz à effet de serre (procédés industriels, séquestration du CO<sub>2</sub>) ; amélioration de l'efficacité énergétique et maîtrise de la demande (transports, habitat et tertiaire, industries).

Cet exercice, qui répond à un réel besoin, est certainement à approfondir et à élargir, en associant les autres établissements publics concernés (BRGM, CSTB...). Il devra être mis en œuvre de manière cohérente avec les propositions d'organisation du présent rapport.

### Les moyens financiers

En 2002, les organismes de recherche ont consacré un budget global, provenant de subventions de l'État et de contrats industriels de 940 M€ à la recherche en énergie réparti en 580 M€ pour le nucléaire, 230 M€ pour les énergies fossiles, 50 M€ sur les énergies renouvelables, 40 M€ sur l'efficacité énergétique et 40 M€ sur l'hydrogène et la pile à combustible. La contribution de l'État à ce budget s'élève à 600 M€ environ.

Aucune analyse administrative disponible à ce jour ne permet de ventiler de façon précise l'utilisation de ces moyens financiers, hors nucléaire, entre les différents thèmes de recherche auxquels ils sont appliqués, même s'il est plus facile d'avoir une approche par entité de recherche que par thème de recherche <sup>(17)</sup>.

Cependant, indépendamment des incertitudes qui pèsent sur les données chiffrées et qui seront évidemment à lever le plus rapidement possible, force est de constater :

- l'importance du montant global de la recherche publique française sur l'énergie - qui pèse lourd au sein de l'effort européen ;
- sa focalisation sur les secteurs du nucléaire et des énergies fossiles ;
- l'importance des crédits consacrés par le CNRS au secteur de l'énergie, et ce, dans quasiment tous les domaines de recherche de ce secteur ;
- la faiblesse des crédits consacrés à la recherche dans plusieurs secteurs de l'énergie :
  - l'effort sur les énergies renouvelables est très faible (50 M€, soit moins de 5 % de l'effort européen) ;
  - si le secteur des transports est pris en compte dans le cadre du Predit, celui des bâtiments est moins bien traité ;
  - la pile à combustible (malgré l'existence du réseau PACO) mobilise des montants de crédits publics minimes (10 M€) chaque année au regard des enjeux ;
  - il en va de même pour l'hydrogène et surtout pour la filière séquestration du CO<sub>2</sub> (capture, transport et stockage du CO<sub>2</sub>), pris en compte dans le cadre du RTPG depuis 2001 et par l'Adème, pour des montants encore très modestes.

Compte-tenu de l'importance de l'énergie nucléaire pour notre pays, il n'est ni surprenant ni anormal que l'effort consenti pour cette technologie soit massif. Pour autant, les moyens mobilisés globalement pour les technologies de l'énergie hors nucléaire, même s'ils se comparent honorablement avec ce que font nos partenaires européens, ne sont sans doute pas à la hauteur des enjeux.

**En conclusion de cette présentation rapide de l'effort public français dans les technologies de l'énergie, il convient de noter que les grands organismes de recherche tels que le CEA ou l'IFP, comme les plus petits, ont déjà bien amorcé un redéploiement de leur activité pour prendre en compte, au delà de leurs missions d'origine, les enjeux du changement climatique.**

<sup>(17)</sup> L'annexe IX tente cependant de présenter les montants de recherche par organisme et par grand thème de recherche.

## Constats

---

**Globalement la France consacre à cette recherche (usages, nucléaire, fossiles, renouvelables) des moyens importants. À court terme, il s'agit moins de mobiliser des moyens publics supplémentaires que de mettre en place une organisation permettant de s'assurer de leur bonne affectation et de l'efficacité de leur utilisation au service d'objectifs reconnus comme prioritaires et intégrés dans des programmes d'action européens cohérents et valorisant mieux les partenariats publics-privés.**

### **Neuvième constat: ancien, l'engagement des entreprises françaises dans les technologies de l'énergie doit être consolidé et n'est pas suffisamment adapté aux impératifs nouveaux de réduction des gaz à effet de serre.**

Le développement des nouvelles technologies de l'énergie au bénéfice de la réduction des gaz à effet de serre ne peut être le fait exclusif ni même prédominant de la recherche publique.

La contribution des entreprises peut et doit être décisive non seulement pour continuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre au-delà de ce qui est déjà accompli pour diminuer les consommations énergétiques, mais aussi pour développer ces nouvelles technologies et pour les exporter en même temps que les équipements et les services qui leur correspondent.

Le constat de la situation actuelle dans l'Industrie ne peut être fait sans distinguer le secteur de la production de l'énergie de l'ensemble des entreprises (de taille très diverses) consommatrices d'énergie pour leur propre production.

Dans le secteur de la production de l'énergie, la France dispose d'entreprises puissantes qui se situent aux premiers rangs de l'industrie énergétique mondiale en termes de capacités technologiques et de parts de marchés, notamment dans les domaines pétrolier, gazier, nucléaire, hydraulique et plus généralement électrique.

Électricité de France, Suez et Gaz de France sont dans le peloton de tête des « opérateurs » électriques et gaziers. Total est un « major » pétrolier. Areva/Framatome est le premier fournisseur mondial de systèmes et d'équipements nucléaires tandis qu'Alstom est l'un des trois premiers fournisseurs mondiaux de systèmes, d'équipements et de services « conventionnels » (hors îlot nucléaires) pour la production d'électricité. D'autres entreprises, sans prétendre à l'exhaustivité, pourraient être citées pour illustrer ce potentiel industriel exceptionnel, par exemple Schneider Electric, Nexans, Technip, CNIM...

Ces positions sont le résultat de la politique d'indépendance énergétique poursuivie avec constance depuis plus d'un demi siècle et qui a permis tout à la fois d'assurer à ces entreprises la base domestique indispensable et le soutien des pouvoirs publics pour leur développement international.

Ces entreprises, comme l'ensemble de l'industrie française, ont su au cours des vingt dernières années réduire substantiellement leur consommation énergétique à production inchangée <sup>(18)</sup>, mais la plupart d'entre elles commencent à intégrer des actions plus spécifiques, contribuant directement ou indirectement à la politique de réduction des gaz à effet de serre.

Tel est le cas évidemment des fournisseurs de systèmes et d'équipements comme Areva/Framatome, Alstom, Schneider, Nexans, Technip, CNIM qui font appel dans leur offre à des technologies nouvelles éliminant ou réduisant les émissions nocives.

---

<sup>(18)</sup> Voir cinquième constat.

## Constats

---

Tel est le cas aussi des opérateurs, gaziers ou pétroliers qui s'impliquent de manière diverse par exemple dans la promotion des énergies renouvelables et dans la problématique de séquestration du CO<sub>2</sub>.

D'autres secteurs industriels ont pris très au sérieux l'impératif de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Au premier rang l'industrie automobile qui est, avec les japonais, à l'avant-garde mondiale du « véhicule propre ».

Une mention spéciale doit être faite d'Électricité de France et de Gaz de France qui ont développé dans le domaine des technologies de l'énergie une R & D importante dans le domaine des usages.

L'ouverture de ces marchés à la concurrence les amènera sans doute à recentrer leur R & D sur les activités de production et de distribution et à renoncer à un certain nombre de recherches sur ces usages pourtant indispensables. Il faudra donc trouver les moyens de compenser ce désengagement.

Peut-être plus préoccupant à ce stade est le fait que la France ne dispose que d'un dispositif industriel modeste qui soit directement orienté vers le traitement des émissions de gaz à effet de serre.

Puissante dans les domaines pétrolier, nucléaire et hydraulique, l'industrie française risque de perdre pied dans celui des turbines à gaz et dans l'ensemble de la filière charbon. La raison essentielle de ces deux lacunes est évidemment l'absence ou la faiblesse du marché domestique qui handicape le développement de l'industrie correspondante.

Dans les domaines les plus nouveaux, la France souffre également d'une insuffisance de politique publique qui handicape l'émergence d'entreprises industrielles de premier rang mondial dans les énergies renouvelables ou la séquestration géologique.

Néanmoins, tirant parti de l'augmentation rapide des marchés de l'éolien et du solaire, plusieurs entreprises acquièrent un savoir-faire grandissant et renforcent leurs positions. Il en est ainsi dans l'éolien avec Areva-Jeumont, Vergnet, Leroy-Sommer et Rollix, dans le photovoltaïque avec Photowatt et ses deux systémiers Total Énergie et Apex BP Solar, dans l'énergie solaire thermique avec Jacques Giordano Industries et Clipsol. L'action conduite par l'Adème dans ce domaine au cours des dernières années a connu des résultats positifs.

L'enquête effectuée par la direction de la demande et des marchés énergétiques de la DGEMP auprès des industriels <sup>(19)</sup> sur la R & D dans les nouvelles technologies de l'énergie révèle une situation préoccupante.

Seulement un peu plus de la moitié d'entre elles ont répondu après de nombreuses relances téléphoniques. Ce fait peut résulter de la simple négligence, mais peut aussi refléter le manque d'intérêt de leur management pour ces questions. Les informations fournies par ces entreprises sur leurs plans de recherche - développement dans les nouvelles technologies de l'énergie se sont révélées extrêmement fragmentaires et ont porté pour l'essentiel sur des projets à court terme soutenus ou ayant vocation à être soutenus par les pouvoirs publics.

---

<sup>(19)</sup> Un questionnaire a été adressé à un large panel d'industriels, allant des producteurs d'énergie aux grands consommateurs, en passant par les équipementiers.

Du coup il est pratiquement impossible de fournir une évaluation de ce que peut représenter l'effort de recherche « industriel » dans ce domaine dans notre pays. Si l'on prenait au pied de la lettre les résultats de l'enquête, on pourrait conclure, de manière sans doute excessive, que, seules, les entreprises publiques et les entreprises des secteurs pétrolier, automobile et sidérurgique s'y sont réellement engagées et qu'en tout état de cause, l'incitation publique est déterminante pour susciter leur intérêt. A la décharge des entreprises françaises, il est honnête de rappeler que, de ce point de vue, la situation n'est pas très différente dans les autres grands pays industriels <sup>(20)</sup>.

Les principales entreprises consommatrices d'énergie et donc émettrices de gaz à effet de serre ont adhéré à l'association AERES en vue d'établir et de déposer auprès de celle-ci un engagement volontaire de réduction des émissions de gaz à effet de serre sur la période 2003-2007. Ces engagements montrent qu'après une réduction importante des consommations d'énergie spécifiques entre 1990 et 2001, les progrès se sont ralentis dans la période récente et les perspectives de progrès d'ici 2010 sont faibles. Ceci signifie qu'à technologie constante, la plupart des gains d'efficacité énergétique ont été faits.

Deux secteurs notamment, celui de l'acier et du ciment, cherchent à promouvoir la réduction du contenu carbone de leur produit.

Arcelor, avec de nombreux partenaires, en Europe au sein d'Eurofer, mais aussi avec des industriels du sud-est asiatique et d'Amérique du sud, a cherché les pistes de rupture pour réduire fortement la consommation d'énergie et identifier les pistes suivantes : le remplacement du carbone en temps que réducteur du minerai de fer par du gaz ou de l'hydrogène ; la capture et la séquestration du CO<sub>2</sub> ; l'utilisation de la biomasse. Les recherches correspondantes sont engagées et pour aboutir à des premiers résultats complets, 40 M€ seront nécessaires sur cinq ans.

Le secteur cimentier vise à réduire fortement le contenu carbone de son produit par quatre leviers : la réduction de sa consommation énergétique grâce à l'amélioration de l'efficacité de ses équipements par l'utilisation progressive de meilleures technologies, le recours croissant à des sources d'énergies alternatives (déchets, biomasse et énergies renouvelables), la substitution partielle du clinker par des matériaux alternatifs tels les cendres volantes ou les laitiers de la sidérurgie valorisant ainsi leurs propriétés de liants hydrauliques et enfin la recherche et le développement en vue de promouvoir une nouvelle classe de ciment au contenu carbone réduit.

D'autres secteurs se sont engagés dans des démarches comparables mais il n'a pas été possible à ce stade de consolider les besoins de recherche à moyen terme de l'ensemble des secteurs industriels pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Pour l'ensemble des industries intensives en carbone et en dépit des efforts significatifs déjà accomplis, une recherche active des pistes de rupture et l'engagement d'une R & D consistante sur les pistes les plus prometteuses est indispensable. L'aide de l'Adème aux recherches sur les équipements génériques (5 M€ par an) est manifestement insuffisante. Les recherches sur les ruptures possibles au niveau des process portent sur le long terme et, en l'absence d'aides publiques, ne sont pas engagées dans un contexte économique difficile à court terme.

---

<sup>(20)</sup> Voir sixième constat.

## Constats

---

**La France dispose d'industries nucléaire, pétrolière et hydraulique puissantes, qui satisfont efficacement tous les besoins nationaux et sont compétitives sur les marchés mondiaux. En revanche, notre pays a perdu sa position de premier rang dans l'industrie du charbon et a un rôle marginal ou pas suffisamment fort dans les industries émergentes de la séquestration et des énergies renouvelables. L'effort propre de recherche-développement de l'industrie reste modeste et devrait être stimulé par une politique publique suivie.**

**S'il est toujours possible d'importer les technologies qui seront développées ailleurs et notamment aux États-Unis, cette option risquerait, si elle devait persister, de compromettre à terme notre compétitivité technologique et industrielle et peut-être de priver notre pays de la maîtrise de certaines technologies correspondant plus particulièrement à ses besoins.**

**La stratégie de développement des nouvelles technologies de l'énergie devrait, sans abandonner nos points forts industriels, encourager, de manière sélective, des percées décisives dans des domaines de faiblesse ou de moindre visibilité, comme les renouvelables, la séquestration géologique et la filière hydrogène.**

# Priorités

---



## Méthode

**Pour guider ses choix, le groupe de travail a commencé par fixer cinq objectifs stratégiques** que devraient permettre de contribuer à atteindre les pistes de recherche à sélectionner :

- la diminution des émissions de gaz à effet de serre
- la compétitivité des entreprises françaises
- la réponse à l'augmentation prévisible de la demande
- l'indépendance énergétique de la France
- la contribution au développement

Ces objectifs pour la recherche de long terme ont été considérés comme suffisamment robustes pour rester pertinents indépendamment des inflexions de la politique énergétique française, qui ne manqueront pas d'intervenir d'ici 2050.

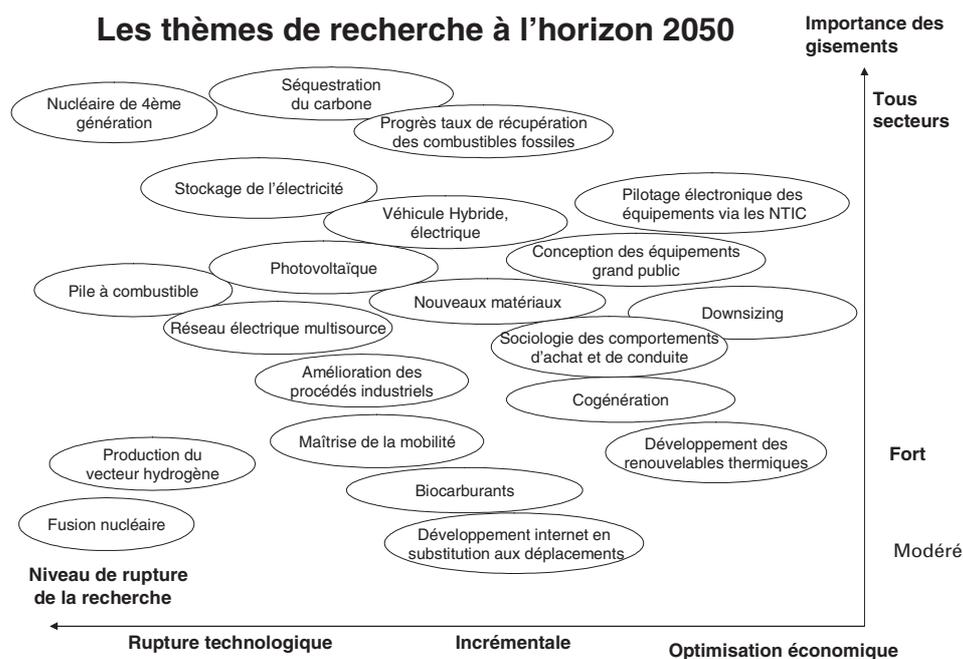
**Le groupe de travail a ensuite choisi de conjuguer la préparation de l'avenir avec des efforts de recherche à effet plus immédiat**, la lutte contre l'effet de serre devant démarrer dès maintenant pour connaître une intensification dans les prochaines décennies.

Les technologies capables de changer fortement la donne en matière d'émissions de carbone sont aussi, le plus souvent, celles qui présentent les horizons temporels les plus éloignés, du moyen au long terme : il s'agit notamment du solaire photovoltaïque à grande échelle, du stockage de l'électricité, de la production, de la distribution et du stockage de l'hydrogène, des piles à combustible pour les transports et pour les applications stationnaires de cogénération de chaleur et d'électricité, des réacteurs à fission nucléaire de génération 4, sans parler de la fusion dont la concrétisation est plus éloignée encore. Plusieurs de ces technologies ont été sélectionnées par le groupe en tant que pistes de recherche prometteuses.

Cependant, le groupe a également examiné des technologies nécessitant des progrès plus modestes et qui peuvent avoir un impact essentiel en termes de réduction des émissions, à court-moyen terme. Il s'agit notamment de progrès importants à réaliser en matière d'efficacité énergétique pour les différents usages (bâtiment, industrie, transports), de techniques liées aux ressources renouvelables (biomasse, biocarburants, énergie éolienne en mer, géothermie profonde), ainsi que de techniques de production d'énergie efficaces liées aux énergies fossiles comme les micro-turbines pour la cogénération d'électricité et de chaleur, et de la séquestration du carbone. Ces technologies, dont certaines doivent être considérées comme des technologies de transition, permettront, sans changement brutal, d'améliorer l'efficacité de notre système actuel et de gagner des marges de manœuvre en attendant l'amélioration des performances et la réduction drastique des coûts qui seules permettront le déploiement sur les marchés des technologies de long terme.

## Priorités

La planche suivante, qui présente une tentative de positionnement des différentes technologies évoquées, en croisant leur maturité technologique avec leur aptitude à diminuer les émissions de dioxyde de carbone, illustre bien cette double nécessité <sup>(21)</sup> :



**Le groupe a pris connaissance des résultats d'une simulation de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par un facteur 4 en France en 2050** réalisée par la MIES et en a tiré plusieurs enseignements importants.

La MIES a réalisé plus de 15 scénarios énergétiques permettant d'atteindre en France l'objectif de réduction des émissions par un facteur 4 en 2050, tenant compte des incertitudes fortes qui pèsent sur l'avenir en termes de niveau des ressources fossiles, de valeur future attribuée ou non à la tonne de carbone, d'acceptabilité sociale des technologies, mais aussi de capacité de puissances économiques d'imposer sur les marchés des choix pouvant être différents de ceux de la France.

Sans porter de jugement sur la pertinence des scénarios, le groupe de travail a relevé les conclusions principales de ces simulations qui permettent d'affiner l'analyse pour la France :

Premièrement, ces scénarios révèlent l'impossibilité d'avoir un secteur des transports qui continuerait de dépendre uniquement du pétrole ; il n'est pas non plus possible d'envisager une production massive d'électricité à partir de combustibles fossiles ni même de gaz naturel ; enfin, abandonner l'énergie nucléaire en 2050 représenterait des difficultés

<sup>(21)</sup> Il faut noter que l'horizon de ce diagramme est 2050, ce qui explique que des technologies comme l'hydrogène ou la fusion, qui, à ce terme, n'auront pas encore produit tous leurs effets potentiels, sont positionnées à un niveau très bas, qui peut surprendre. D'autre part, ce diagramme, nécessairement simplificateur, ne prétend pas faire figurer toutes les technologies, ni les positionner de façon « scientifique » selon les deux axes.

insurmontables supposant un niveau très élevé d'efficacité énergétique, des évolutions radicales de modes de vie, un développement irréaliste des énergies renouvelables et de la séquestration du carbone, aux plans technologique et économique.

Deuxièmement, tous les scénarios réalisés exigent un effort de maîtrise généralisée dans les usages, y compris dans le secteur électrique, même dans l'hypothèse d'un développement massif du nucléaire car l'équilibre du réseau nécessitera une part de production de pointe reposant sur des énergies fossiles ; ils intègrent tous une proportion significative d'énergies renouvelables, qui permettent une diversification du système énergétique, assurent la relève des combustibles fossiles dans les usages thermiques et dans les transports et participent à la production électrique.

Troisièmement, ces simulations mettent en évidence le fait que plusieurs technologies permettraient d'alléger la contrainte liée à la réduction des émissions : la maîtrise de la séquestration du CO<sub>2</sub> créerait des marges de manœuvre pour faciliter la mutation des transports (par possibilité d'utilisation du pétrole), garder un appoint de production électrique et de chaleur à partir des combustibles fossiles ; des progrès réalisés dans le stockage massif de l'électricité permettrait d'intégrer dans les réseaux électriques des productions discontinues et éparpillées notamment renouvelables ; l'avènement d'une économie de l'hydrogène est étroitement liée à la séquestration concernant les ressources fossiles et pourrait faire - à terme - une large place à la production d'origine nucléaire.

Enfin, au-delà d'un nécessaire effort d'efficacité énergétique, des espaces de choix existent, essentiellement dans la composition du bouquet énergétique entre l'option nucléaire, l'option renouvelables et l'option énergies fossiles associée à la séquestration du carbone. Ces espaces de choix sont intimement liés aux incertitudes qui pèsent sur la maîtrise des technologies citées ci-dessus : la séquestration du carbone conditionne l'utilisation des énergies fossiles, le stockage de l'électricité favorise le développement des énergies renouvelables, tandis que l'économie de l'hydrogène fait - à terme - une large place à la production d'origine nucléaire.

**Le groupe a enfin adopté une approche non dogmatique**, en donnant une place importante au débat entre ses membres. Ces débats ont principalement concerné l'énergie nucléaire, les technologies relatives aux énergies fossiles, le vecteur hydrogène et les biocarburants.

L'énergie nucléaire a suscité les débats, certains membres du groupe faisant valoir le déséquilibre entre la recherche nucléaire et la recherche relative aux énergies renouvelables. Le groupe a conclu qu'il n'était pas pertinent d'opposer ces deux énergies - seules à ne pas rejeter de gaz à effet de serre - et qu'il fallait au contraire insister sur leur complémentarité. Il a proposé de confirmer l'engagement de la recherche française dans le nucléaire tout en favorisant le développement de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et en trouvant une solution satisfaisante au problème posé par les déchets nucléaires à l'issue du moratoire de 15 ans prévu par la loi Bataille.

En ce qui concernent les énergies fossiles, plusieurs membres du groupe ont déploré la diminution des montants alloués au réseau de technologies pétrolières et gazières

(ex. fonds de soutien aux hydrocarbures) ainsi que l'absence de crédits en faveur des énergies fossiles dans le 6<sup>e</sup> PCRD et mis en avant les montants importants d'aide de l'État américain aux entreprises de ce secteur, de nature à pénaliser les entreprises européennes. Le groupe a considéré que c'était surtout dans le domaine de la séquestration du gaz carbonique que ce soutien faisait défaut en France.

Le groupe a retenu l'inscription des biocarburants parmi les thèmes de recherche, dans une optique d'amélioration des rendements et de baisse des coûts pour les biocarburants actuels **mais surtout d'élargissement de cette filière aux carburants de synthèse produits à partir de la biomasse par utilisation de la totalité de la matière ligno-cellulosique**. Le groupe de travail effectue à ce titre une distinction importante entre les biocarburants utilisés actuellement et les futurs carburants de synthèse, issus de la biomasse, qui seront des produits très proches des meilleurs essences et gazoles actuels, totalement miscibles avec les carburants classiques, même à des taux très importants. Le secteur des transports est le seul qui connaisse aujourd'hui une croissance forte de ses besoins énergétiques, et le plus dépendant des énergies fossiles (95 % de ses besoins sont assurés par le pétrole). Compte tenu de l'avantage important en termes de coûts et d'infrastructures que représentent, encore pour de nombreuses années, les carburants liquides, le groupe considère qu'une solution « renouvelable » comme les biocarburants actuels et futurs, offre, au moins à titre de transition, une réelle perspective de maîtriser les émissions diffuses de carbone liées à ce secteur. Cette solution peut ainsi se combiner, dans une optique d'optimisation globale du coût de la lutte contre l'effet de serre, avec une hybridation des véhicules et l'amélioration des moteurs thermiques, en attendant d'autres solutions plus coûteuses comme l'hydrogène et la pile à combustible.

Mais c'est sur l'hydrogène que les débats ont été les plus animés : utopie pour les uns, panacée pour les autres, ce vecteur d'énergie ne fait pas l'unanimité. Ses défenseurs mettent en avant le caractère profondément novateur d'un nouveau système énergétique fondé sur l'hydrogène et non plus sur le carbone, ainsi que les investissements massifs qui lui sont consacrés par les États-Unis et le Japon. Ses détracteurs pointent, en revanche, tous les verrous technologiques qui sont à lever, avant que la production de ce vecteur puisse se faire sans émission de gaz carbonique et qu'il puisse être distribué au travers d'un réseau dense qui soit supportable économiquement. Ils soulignent également le fait que les grandes puissances qui ont misé sur l'hydrogène investissent également dans de nombreux autres domaines (cf. constat n° 6). Le groupe a cependant décidé de faire figurer l'hydrogène dans ses priorités pour la recherche française et européenne, en toute conscience des incertitudes qui planent sur l'avenir de ce vecteur, afin de ne pas faire risquer aux industriels français d'être exclus d'une éventuelle « économie de l'hydrogène ».

Afin d'avancer en parallèle sur une piste alternative de stockage de l'énergie, le groupe a également souhaité mettre l'accent sur le stockage de l'électricité. Son attention a également été appelée sur l'importance à donner à la gestion des nouveaux systèmes électriques (réseau électrique intelligent) dans un contexte de libéralisation des marchés et de déconcentration de la production d'électricité.

Au-delà de ces sujets de débats, le groupe a unanimement donné la priorité aux technologies de maîtrise de la demande et d'amélioration du bilan carbone dans les transports, l'habitat et l'industrie.

## Conclusions générales

Compte tenu des analyses qui précèdent, le groupe a conclu que, pour faire face dans des conditions économiques supportables à la demande d'énergie dans les 50 ans à venir, dans le respect de l'environnement, tout en préservant la sécurité des approvisionnements, ainsi que la compétitivité des entreprises françaises, la recherche dans les nouvelles technologies de l'énergie conduite par l'État et par les entreprises devait être guidée par les trois considérations suivantes :

● **Le problème ne peut pas être résolu sans progrès massifs de l'efficacité énergétique dans les trois principaux secteurs (bâtiment, industrie, transports), ni sans une mutation profonde dans les transports**, recouverte en partie par l'amélioration de l'efficacité énergétique de ce secteur grâce aux nouvelles motorisations, mais faisant aussi appel à de nouveaux carburants, à une descente en gamme des véhicules, à une évolution des comportements et de l'organisation du secteur <sup>(22)</sup>.

Cette approche correspond à une stratégie « sans regret », de nature à réduire considérablement la demande dans les cinquante ans à venir (cf. constat n° 2), ce qui aura des conséquences positives à la fois sur une plus grande facilité à satisfaire cette demande, sur les émissions de gaz à effet de serre et sur l'indépendance énergétique de la France. L'impact sur la compétitivité des entreprises française pourra aussi être non négligeable, car la maîtrise de la demande est de nature à être exportée - sous la forme de marchés de bâtiments ou de véhicules - vers les pays en voie de développement notamment, qui devront faire face à une explosion de leur demande d'énergie difficilement supportable par leur économie émergente. De plus, maîtriser la demande au Nord, en particulier dans les transports, conduirait dans un premier temps à « laisser » ces pays utiliser davantage de pétrole - certes dans des proportions supportables pour le climat - ce qui ne peut que favoriser leur accession au développement.

Le groupe souligne que l'arsenal des technologies de maîtrise de la demande d'énergie comprend des technologies déjà mûres, notamment dans le domaine du bâtiment, qu'il suffit d'aller chercher sur étagère, en favorisant leur adoption par les consommateurs (ampoules et équipement basse consommation, matériaux isolants...). Au-delà, les perspectives technologiques de maîtrise de la demande concernent de nombreuses évolutions de moyen et long terme :

– nouvelles motorisations (amélioration des moteurs à combustion interne, moteurs hybrides et électriques, pile à combustible) et carburants alternatifs (GTL, GNV, biocarburants, carburants de synthèse issus de la biomasse...) dans les transports ;

---

<sup>(22)</sup> Quoique hors champ des réflexions du groupe, ces deux dernières évolutions sont soulignées comme un complément absolu aux améliorations technologiques.

- développement des énergies renouvelables et de la trigénération dans le bâtiment pouvant conduire progressivement à un bâtiment assurant ses propres besoins d'énergie, puis même à un bâtiment restituant de l'énergie sur le réseau, que le groupe a nommé « bâtiment à énergie positive » ;
- sauts technologiques dans l'industrie pour les procédés utilisés par les branches industrielles fortement consommatrices d'énergie (sidérurgie, cimenteries, tuiles et briques, papiers, etc.) et amélioration de nombreux procédés communs à la plupart des branches industrielles (chaîne du froid, ventilation et chauffage, procédés de broyage, de séparation ou de séchage, etc.), développement du recyclage, valorisation des co-produits.

● **Compte tenu de l'incertitude sur la composition du bouquet énergétique en 2050, le groupe considère que la France ne peut pas, sans dommage sur les objectifs stratégiques qu'il s'est fixés, renoncer à maîtriser les technologies relatives aux trois énergies : énergies fossiles associées à la séquestration du CO<sub>2</sub>, énergies renouvelables et énergie nucléaire.** En 2050, l'une de ces énergies aura peut-être pris un avantage décisif sur les deux autres, mais le pari est aujourd'hui trop risqué à prendre.

– L'éligibilité des énergies fossiles dans le mix énergétique de 2050 repose sur le développement de la séquestration du carbone, (coûts, gisements disponibles, sécurité) ; sous cette réserve, l'amélioration des rendements d'extraction du pétrole qui sont aujourd'hui très faibles (30 %) représente un enjeu important ; par ailleurs, avant que la séquestration ne puisse se généraliser, l'amélioration des rendements des centrales à gaz et à charbon aura un impact considérable sur les émissions de pays comme la Chine ou l'Inde.

– Celle de l'énergie nucléaire repose quant à elle sur une solution satisfaisante à la question des déchets, la réussite des réacteurs de génération 4, puis celle de la fusion, dont le déploiement se ferait bien au-delà de 2050 mais qui nécessite des recherches dès aujourd'hui.

– Enfin, la proportion d'énergies renouvelables parmi les énergies primaires sera conditionnée par leurs coûts relatifs dans chaque application (thermique, électrique, carburant) ; c'est donc vers la réduction des coûts que doit être orientée la recherche sur la biomasse, l'éolien, la géothermie, le solaire thermique et photovoltaïque, de manière bien coordonnée avec les incitations à la pénétration sur les marchés.

● **L'incertitude qui pèse sur les vecteurs d'énergie en 2050 étant analogue à celle qui concerne les sources d'énergie primaire, le groupe estime nécessaire de miser à la fois sur le vecteur électricité et sur le vecteur hydrogène, sans oublier le potentiel de progrès dans l'utilisation de carburants liquides pour les véhicules.** La substitution de biocarburants aux produits pétroliers ouvrirait une marge de manœuvre nouvelle au secteur des transports, en combinaison éventuelle avec l'hybridation des véhicules.

Des progrès décisifs dans le stockage rapide de l'électricité ouvriraient la voie à une hybridation plus poussée puis au véhicule électrique et à un transfert plus ou moins important vers l'électricité des consommations liées au transport, ainsi qu'à l'intégration des énergies renouvelables " intermittentes " dans les réseaux électriques et à une gestion optimisée de la courbe de charge du système électrique. Un avènement de " l'économie de l'hydrogène " répondrait aux mêmes besoins d'une autre manière. Ainsi une réussite majeure concernant l'un de ces vecteurs serait théoriquement de nature à disqualifier largement les autres, mais il y a fort à parier que ces solutions coexisteront dans l'espace et dans le temps ; en tout état de cause, et encore une fois, il est prématuré de trancher.

● **Le groupe souligne que le développement de systèmes énergétiques à faible contenu en carbone nécessite des innovations qui vont bien au-delà du développement des technologies qui le composent.** Les infrastructures actuelles de distribution et d'utilisation de l'énergie (électricité, gaz) devront être adaptées, tandis que de nouvelles pourront être créées (hydrogène, CO2...). C'est pourquoi le groupe souhaite figurer parmi les technologies pour lesquelles la recherche a un rôle clef à jouer la « gestion du système électrique intelligent ».

● Enfin, les considérations des marchés à l'export ne peuvent pas ne pas jouer un rôle essentiel dans la définition des politiques nationales. Ceci concerne l'Europe, mais aussi les PED du Sud, et les pays à fort enjeu énergétique que sont l'Inde, la Chine et l'Asie du Sud Est. De ce point de vue, les enjeux de la séquestration géologique, du charbon propre, de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables seront essentiels.

Ces considérations générales, valables pour la France, le sont aussi, dans une large mesure, pour l'Europe dans son ensemble, même si État-membre par État-membre, des adaptations peuvent se révéler nécessaires en fonction des sensibilités ou des ressources naturelles.

### Les priorités pour la France

Les conclusions générales qui précèdent devraient dans le cadre de l'Europe guider la recherche de la France. Cependant, cette dernière n'ayant pas les moyens de se positionner sur l'ensemble des pistes technologiques, le groupe de travail a effectué une nécessaire sélection, qui a été notamment réalisée sur la base de l'analyse multicritères présentée en introduction à ce chapitre.

L'impact de chaque technologie sur les cinq critères retenus a été évalué à l'horizon temporel où chacune de ces technologies sera arrivée à maturité, ce qui n'est pas le cas pour beaucoup d'entre elles. C'est pourquoi ces critères ont ensuite été complétés par des critères de faisabilité permettant d'évaluer la difficulté d'introduction de ces technologies sur les marchés, ainsi que la capacité des entreprises françaises à les maîtriser :

- **Stade de développement et perspectives** : l'évaluation du stade de développement de la technologie est important pour mesurer le temps qui sera nécessaire avant d'assister à un déploiement industriel et donc proportionner l'effort de recherche. La classification proposée par le groupe est faite par ordre de maturité technologique : les technologies de rupture concernent des options encore au stade de la recherche fondamentale. La réussite n'est pas garantie, quels que soient les moyens mis en œuvre ; les technologies de discontinuité recouvrent des options dont la viabilité technologique est prouvée, pouvant être déjà introduites sur des marchés de niche, mais qui nécessitent encore des développements et une meilleure pénétration des marchés avant d'atteindre des réductions de coûts et une généralisation. La réussite dépend des moyens mis en œuvre ; enfin, les technologies incrémentales sont des options ayant atteint un stade de développement technologique avancé et viable commercialement, mais pouvant ne pas encore être largement répandues sur les marchés.
- **Position actuelle de l'industrie française dans le domaine** : ce critère évalue le positionnement stratégique des entreprises françaises sur la technologie considérée et permet d'évaluer si leur renforcement est nécessaire dans le cas où la technologie est de nature à conférer un avantage compétitif ;
- **Acceptabilité sociale** : ce critère est considéré comme très important par le groupe, car il peut conditionner l'adoption d'une technologie par les marchés.

Le résultat de cette analyse multicritères pour les technologies retenues par le groupe est en annexe X.

Cette analyse permet de rappeler les points forts industriels de la France dans le secteur de l'énergie : s'agissant de la production, notre pays occupe une position de leader ou, à tout le moins, se situe parmi les leaders mondiaux dans les domaines du nucléaire, du pétrole et du gaz, de la production d'électricité et possède des atouts dans le domaine des énergies renouvelables - notamment dans la biomasse et les biocarburants - et dans la géothermie ; du côté des usages, la France occupe des positions de premier plan dans les secteurs de l'automobile, du bâtiment et des matériaux de construction.

Elle fait également ressortir le fait que rares sont les technologies qui ne sont pas susceptibles d'être développées dans le cadre d'un partenariat européen, voire international et que toutes, à l'exclusion de la fusion thermonucléaire, engagent à des degrés divers un partenariat recherche publique-recherche privée.

Un classement non exhaustif de l'ensemble des technologies de l'énergie en fonction de la date probable de leur déploiement sur les marchés - en intégrant bien sûr les incertitudes qui pèsent sur la réalité de ce déploiement - avec l'indication de l'intensité de l'attention qui devrait leur être accordée par les acteurs français de la recherche publique et privée (+ France suiveur, ++ : France partenaire important ou +++ : France co-leader), pourrait être le suivant :

### **Positionnement stratégique de la recherche française en énergie**

#### **À court terme: technologies « incrémentales »**

Efficacité énergétique dans le bâtiment : matériaux, équipements électriques, ventilation, régulation, etc. (+++)

Efficacité énergétique dans les transports : amélioration des moteurs à combustion interne, véhicule hybride (+++)

Efficacité énergétique dans l'industrie : évolution des procédés thermiques vers des procédés électriques, économies d'énergie liées aux « utilités », conception de produits à contenu énergétique limité (+++)

Efficacité énergétique dans la production d'électricité : amélioration des rendements de production (+++), nouveaux combustibles pour le nucléaire (+++)

Énergies renouvelables : éolien en mer (++), solaire thermique basse température (++), géothermie basse énergie avec PAC (++), biocarburants (++)

Énergies fossiles : carburants gazeux (GNV) (++) , améliorations en exploration et production d'hydrocarbures classiques et non conventionnels (++) , valorisation du gaz naturel (++)

#### **À moyen terme, technologies de « discontinuité » (2015-2025) :**

Efficacité énergétique dans le bâtiment : intégration des renouvelables, pile à combustible, petite cogénération, nouveaux matériaux, débuts du bâtiment « zéro énergie » avec couplage solaire-géothermie notamment (+++)

Efficacité énergétique dans les transports : véhicule à hybridation poussée, véhicule électrique limité à des niches, début des véhicules à pile à combustible (+++)

Efficacité énergétique dans l'industrie : amélioration des procédés, conception de produits à contenu énergétique limité (+++)

Énergies renouvelables : solaire photovoltaïque (++) et intégration dans le bâtiment (+++), carburants de synthèse ex. biomasse (+++)

## Priorités

---

Énergies fossiles : séquestration du CO2 (+++), Gaz to liquid (++) , Coal to liquid (+)

Énergie nucléaire : prototype de réacteur de génération 4 (+++)

Vecteurs : réseau électrique intelligent (+++)

### **À long terme, technologies de ruptures (2050)**

Efficacité énergétique dans le bâtiment : bâtiment « à énergie positive » (+++)

Efficacité énergétique dans les transports : véhicule électrique, pile à combustible alimentée à l'hydrogène (+++)

Efficacité énergétique dans l'industrie : décarbonation des procédés de l'industrie lourde, réduction à l'hydrogène dans la sidérurgie (+++)

Énergies renouvelables : nouvelle génération de renouvelables (++) , géothermie profonde (+++)

Énergie nucléaire : fusion (++)

Vecteurs : stockage de l'électricité, production, transport et stockage de l'hydrogène. (++)

En conclusion, deux catégories de technologies sont mises en avant par le groupe : celles sur lesquelles la France doit garder ou acquérir une position de leader, sans que cela soit bien sûr exclusif de la notion de partenariat ; et celles où elle souhaite être un partenaire important, sans toutefois prétendre à un statut de leader sur l'ensemble de la filière technologique, ce qui n'empêche pas qu'elle puisse tenir des positions de leader sur des maillons de cette filière :

### **Technologies sur lesquelles la France doit entretenir un niveau de R & D de nature à maintenir sa position de leader ou à atteindre une telle position :**

Le groupe de travail en a sélectionné six :

#### **Efficacité énergétique dans les usages finals**

En premier lieu, le groupe considère que le panel des technologies de court, moyen et long terme permettant d'améliorer l'efficacité dans les usages finals est à classer en priorité n° 1.

Technologies « France co-leader » (court, moyen et long terme)	Partenariat européen	Partenariat mondial	Partenariat public/privé	État actuel de l'effort public français
Efficacité énergétique dans les transports (court, moyen et long terme)	Oui	Oui, entre entreprises privées	Oui	Satisfaisant
Efficacité énergétique dans le bâtiment (court, moyen et long terme)	A examiner par domaine	Non	Oui	Très insuffisant
Efficacité énergétique dans l'industrie (court, moyen et long terme)	A examiner par domaine	Oui, entre entreprises privées	Oui	Insuffisant

En effet, l'efficacité énergétique dans les usages finals, qui ressortait comme une priorité générale, l'est aussi au premier chef pour la France, qui dispose de tous les atouts scientifiques, technologiques et industriels pour s'engager dans une recherche plus active qui concerne à la fois les secteurs des transports, de l'habitat-tertiaire et de l'industrie.

Dans le domaine des transports, l'organisation de la recherche française, centrée sur le Prédit, paraît adaptée. Les moyens le seront également, si l'enveloppe financière supplémentaire prévue par le rapport « véhicule propre » (+ 38 M€) est effectivement allouée. Le sujet peut être traité à l'échelon français.

Dans le secteur du bâtiment, le dispositif actuel (Adème, CSTB...), ainsi que les moyens financiers ne sont pas à la hauteur de l'enjeu de ce secteur. Une organisation doit être mise en place, qui permette des synergies entre les nombreux acteurs impliqués : maîtres d'œuvre, architectes, entrepreneurs, corps de métiers, constructeurs de matériaux, etc. Le sujet peut être traité à l'échelon français dans un premier temps, mais des liens forts pourront être établis avec de nombreux pays européens.

Pour l'industrie, l'effort est également insuffisant. Il devrait être amplifié dans le cadre d'une organisation axée sur quelques grands secteurs fortement émetteurs de gaz à effet de serre.

### Fission nucléaire

Le groupe considère également que l'énergie nucléaire de fission doit demeurer pour la recherche française une priorité de recherche de niveau 1, afin de conforter la position actuelle du secteur.

Technologies « France co-leader » (long terme)	Partenariat européen	Partenariat mondial	Partenariat public/privé	État actuel de l'effort public français
Fission nucléaire-	Oui, dans le cadre d'Euratom	Oui, dans le cadre de « génération 4 »	Oui	Satisfaisant

## Priorités

---

L'effort doit continuer d'être réparti entre la gestion des déchets, facteur clef de l'acceptabilité sociale de l'énergie nucléaire, l'amélioration du parc actuel et la génération 4 de réacteurs.

### Séquestration du dioxyde de carbone

Le groupe considère que la séquestration du CO<sub>2</sub> est une technologie à classer en priorité de niveau 1, car, permettant l'utilisation dans de bonnes conditions environnementales des ressources fossiles, elle représente une condition d'existence des opérateurs pétroliers. Elle est aussi la garantie de l'avenir d'industries françaises de premier plan dans le domaine du ciment, de l'acier et de la chimie lourde, la séquestration permettant l'élimination du CO<sub>2</sub> de process industriel. Elle représente d'autre part un bon créneau pour l'exportation vers les pays du sud.

Technologies « France co-leader » (moyen terme)	Partenariat européen	Partenariat mondial	Partenariat public/privé	État actuel de l'effort public français
Séquestration du CO <sub>2</sub>	Oui, dans un cadre à définir	Oui, dans un cadre à définir	Oui, à organiser	Très insuffisant

L'effort actuellement consenti en France est très insuffisant sur cette technologie.

58

### Carburants de synthèse issus de la biomasse

Les carburants de synthèse issus de la biomasse, classés en priorité 1 par le groupe, permettraient à la fois de répondre de façon significative au problème des émissions des transports, de valoriser le potentiel agricole de la France et le savoir-faire de ses organismes de recherche et de ses entreprises.

Technologies « France co-leader » (moyen terme)	Partenariat européen	Partenariat mondial	Partenariat public/privé	État actuel de l'effort public français
Carburants de synthèse issus de la biomasse	À examiner par domaine	Non	Oui	Insuffisant

### Réseau électrique intelligent

Technologies « France co-leader » (moyen terme)	Partenariat européen	Partenariat mondial	Partenariat public/privé	État actuel de l'effort public français
Réseau électrique intelligent	Oui dans un cadre à définir	Non	Oui	Suffisant

## Géothermie profonde

Technologies « France co-leader » (long terme)	Partenariat européen	Partenariat mondial	Partenariat public/privé	État actuel de l'effort public français
Géothermie profonde	Oui	Non	Oui	Insuffisant

## Technologies sur lesquelles la France doit entretenir un niveau de R & D de nature à occuper une position de partenaire important :

La France, pays leader dans le secteur nucléaire, ne peut pas, compte tenu des enjeux, être absente sur les technologies des énergies fossiles et renouvelables. C'est pourquoi au-delà d'un positionnement fort nécessaire sur la séquestration du CO<sub>2</sub>, le groupe recommande le maintien du niveau de recherche sur les technologies fossiles (exploration-production, gas to liquid) et une augmentation sensible des moyens sur certaines technologies de renouvelables, comme l'éolien en mer et le solaire photovoltaïque. Enfin, dans les domaines à horizon plus lointain de l'hydrogène et de la fusion, la France peut également prétendre tenir une place de partenaire important. Les technologies sur lesquelles le groupe de travail considère que la France doit tenir une place de « partenaire important » figurent dans le tableau ci-après :

Technologies « France partenaire » important	Partenariat européen	Partenariat mondial	Partenariat public/privé	État actuel de l'effort public français
Production, transport et stockage de l'hydrogène	Oui dans un cadre en cours de définition	Oui dans un cadre en cours de définition	Oui	Insuffisant
Pile à combustible	Oui dans un cadre en cours de définition	Oui dans un cadre en cours de définition	Oui	Insuffisant
Éolien en mer	Oui	Non	Oui	Insuffisant
Photovoltaïque	Oui dans un cadre à définir	Oui dans un cadre à définir	Oui	Insuffisant
Fusion (long terme)	Oui dans le cadre d'Euratom	Oui dans le cadre d'ITER	Non à l'échéance 2050	Satisfaisant
Amélioration en exploration et production d'hydrocarbures classiques et non conventionnels	Non	Non	Oui	Satisfaisant
Charbon propre	Oui	Oui	Oui	Insuffisant
Gas to Liquids	Non	Non	Oui	Satisfaisant

## Priorités

---

Le groupe de travail considère qu'il faut à présent aller bien au-delà de l'exercice auquel il s'est livré, en réalisant un travail plus lourd de préparation et de planification des programmes de recherche, consolidant ou mettant en œuvre les priorités qu'il a dégagées. Parmi les programmes nouveaux, il paraît clair que devraient figurer un programme séquestration du CO<sub>2</sub>, un programme hydrogène, un programme photovoltaïque et des programmes d'efficacité énergétiques dans le bâtiment et l'industrie. La troisième partie de ce rapport donne des éléments de méthode pour réaliser cette programmation.

Enfin, le groupe souligne que le secteur des sciences humaines et sociales, qu'il n'a pas eu les moyens d'aborder en détail, n'en est pas moins un secteur de recherche clef, indispensable pour comprendre et anticiper les réactions des citoyens face à l'introduction des nouvelles technologies.

# **Recommandations**

---



# Recommandations

---

La programmation et la mise en œuvre de la politique de Recherche en France doit associer trois partenaires : les organismes publics en charge de la recherche, les industriels et le gouvernement. Le gouvernement dispose actuellement de deux moyens d'actions pour la mise en œuvre de sa politique : la tutelle des organismes publics sur la base d'une contractualisation pluriannuelle avec l'État et les dispositifs incitatifs. Ces actions s'expriment dans trois espaces structurants : la France, l'Europe et l'international.

L'objectif est connu : diviser environ par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 2000 et 2050 dans les pays industrialisés. Si le problème est international, il demande au niveau français, l'affichage de priorités de recherche qui doivent être présentées et défendues à l'échelon européen pour assurer une cohérence des programmes de recherche avec l'ensemble des États Membres dans le but d'atteindre, sur certains secteurs, une masse critique qui rendra crédible et concurrentiel pour les industriels l'effort européen dans le contexte international.

Les étapes permettant d'atteindre cet objectif pourraient être les suivantes :

La première étape consiste à identifier pour la France les objectifs opérationnels à l'horizon 2050 par grand secteur thématique, du domaine de la recherche fondamentale à celui de la recherche industrielle.

Sur la base des constats que ce rapport a établis et des objectifs identifiés, une stratégie à long terme de la politique de recherche sur les énergies doit être formalisée.

Ces inflexions stratégiques doivent être construites et partagées au sein d'un comité regroupant les organismes publics, les industriels et les administrations centrales des ministères en charge de la Recherche, de l'Industrie, de l'Écologie et sans doute de l'Équipement, des Transports et du Logement, sous la présidence du Ministère en charge de la recherche.

Il reviendra au Gouvernement de décider de la politique de recherche, de la proposer au Parlement courant 2004, dans le cadre du futur projet de loi sur les énergies et du futur projet de loi d'orientation de la recherche et de mettre en place, sous l'égide du ministère en charge de la Recherche, un comité de pilotage regroupant l'ensemble des partenaires.

## **La programmation de la Recherche: dégager des priorités de recherche**

Le groupe de travail souligne que les moyens publics de la recherche sur l'énergie en France sont importants et supérieurs à son poids économique dans l'Europe : ceci est vrai si les efforts consacrés à l'énergie nucléaire sont pris en compte, mais l'est encore hors nucléaire. Le groupe considère cependant que cet investissement dans la recherche est conforme aux ambitions de la France dans l'Europe de l'énergie.

Le groupe pense avoir montré dans les première et deuxième parties de son rapport que les investissements de recherche publique/privée n'étaient pas à la hauteur des enjeux

## Recommandations

---

dans plusieurs domaines : efficacité énergétique dans le bâtiment et l'industrie, séquestration du CO<sub>2</sub>, biocarburants et carburants de synthèse issus de la biomasse, hydrogène et pile à combustible, solaire photovoltaïque,...

Il est aussi apparu au groupe que les organismes de recherche ont entrepris ces dernières années une diversification vers les nouvelles technologies à partir de leur métier de base : tel est le cas du CEA, qui a lancé des programmes sur l'hydrogène et le solaire photovoltaïque par exemple ou bien encore l'IFP qui travaille déjà sur les biocarburants et la séquestration du CO<sub>2</sub>. Le groupe considère que l'opportunité et la possibilité d'accroître de tels redéploiements devraient être analysées. De même, il paraît très souhaitable pour le groupe qu'un examen précis des recherches effectuées par le CNRS soit réalisé, afin de délimiter la frontière qui existe entre la recherche académique et la recherche plus appliquée. Cette dernière devrait être orientée davantage qu'aujourd'hui dans le cadre des programmes identifiés comme prioritaires.

Il convient donc d'associer les acteurs de la recherche et du monde industriel ainsi que les départements ministériels concernés, sous l'égide du Ministre en charge de la recherche pour dégager les priorités de recherche dans le domaine de l'énergie. Cet exercice doit être mené en tenant compte de la distinction entre les crédits incitatifs et les crédits de fonctionnement nécessaires à la stabilité des organismes publics de recherche, des attentes des industriels et de la constitution de l'espace européen de la recherche.

### Les moyens de la programmation

Au-delà des redéploiements qui paraissent envisageables par le groupe, de nouveaux outils de financement peuvent être imaginés.

L'existence en France du fonds de la recherche technologique (FRT), du fonds national de la science (FNS) et des crédits de soutien à la R & D du Minéfi, de l'Adème et de l'ANVAR, devrait être renforcée par une ou plusieurs « fondations » de recherche. Ce nouveau régime devrait permettre, grâce aux incitations fiscales qu'il prévoit, d'orienter des financements vers la réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui figure parmi les grands thèmes prioritaires d'application de ce nouveau dispositif. Il devrait surtout permettre de démultiplier les actions de recherche conduites conjointement par des laboratoires publics et privés. À ce titre, les laboratoires publics engagés fortement dans ce type d'action devraient recevoir un encouragement à travers l'attribution des crédits publics nécessaires à leur fonctionnement.

Il conviendra d'examiner comment les mécanismes destinés à inciter les acteurs du marché à réduire leur consommation par la voie des certificats d'énergie peuvent contribuer d'une manière ou d'une autre au financement de la recherche.

Cependant, il convient de ne pas oublier que les industriels français estiment qu'ils bénéficient pour leur R & D de moins d'aide publique directe que dans les autres pays industrialisés, tandis que les pouvoirs publics constatent que l'investissement sur fonds propres des industriels n'est pas à la hauteur des enjeux. Les industriels subordonneront

sans doute leur participation à la définition de modalités de mise en œuvre de ce dispositif qui garantissent à leur apport un retour réel en termes de résultats de recherche.

Si ces pistes se révélaient insuffisantes, et si apparaissait au fil des années un écart croissant par rapport aux objectifs fixés pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, le recours à une loi de programmation ne devrait pas être exclu.

### **Pilotage de la R & D en France**

Tout au long de ses travaux, le groupe a fait plusieurs constatations :

- La réunion de données fiables sur les stratégies de R & D dans les technologies de l'énergie et sur les moyens de mise en œuvre dans les différents pays industrialisés, y compris l'Europe et la France, est difficile.
- La coordination entre les équipes concernées des ministères respectivement en charge de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement est insuffisante, alors que le premier est en charge de la politique de l'énergie, le second de la politique de recherche sur l'énergie et le troisième de la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- L'équipe chargée du pilotage de la R & D des NTE au sein du ministère de la Recherche, bien que d'excellente qualité, dispose de moyens très limités, couvre de nombreux domaines au-delà de celui de l'énergie, et ne gère qu'une partie des crédits publics de R & D consacrés à l'énergie.

Compte-tenu de l'ampleur des défis, en particulier celui d'une réduction drastique des émissions de CO<sub>2</sub> et de la nécessité de s'y préparer de façon forte et continue sur une longue période, le groupe de travail insiste sur la nécessité de mettre en place un système de gestion de la R & D dans l'énergie conforme aux principes reconnus et acceptés du management de projets.

### **Une maîtrise d'ouvrage renforcée**

La conduite d'ensemble doit être assurée par une maîtrise d'ouvrage forte bénéficiant d'un appui politique ferme et constant. Cette maîtrise d'ouvrage a la responsabilité de fixer les objectifs, de faire établir et respecter par les organismes de recherche les « plans de route » adaptés à ces objectifs, de veiller à la valorisation des résultats, de communiquer sur les actions conduites et les résultats obtenus notamment pour susciter l'adhésion du public à ces recherches.

Elle doit avoir la capacité d'orienter les crédits incitatifs affectés à la R & D dans les technologies de l'énergie vers les organismes publics de recherche ou vers les entreprises conformément aux priorités décidées par le Gouvernement.

Cette maîtrise d'ouvrage forte doit s'appuyer sur des maîtrises d'œuvre aux responsabilités clairement identifiées qui établiront les programmes confiés à l'exécution des organismes publics de recherche et des laboratoires privés travaillant en réseau.

## Recommandations

---

Cette même maîtrise d'ouvrage devra avoir la capacité d'établir avec l'aide des maîtres d'œuvre des programmes, des liens contractuels de caractère pluriannuel qui permettront l'adaptation progressive des organismes de recherche à l'évolution de leurs missions dans le cadre de budgets de fonctionnement, financés au moins partiellement par l'État.

Ces constatations et considérations ont conduit le groupe de travail à faire trois recommandations :

- Confier explicitement à l'Observatoire de l'énergie existant, et placé sous l'autorité de la DGEMP, une mission de veille sur les stratégies des grands pays industrialisés en matière de recherche sur l'énergie et de collecte des données sur les moyens, notamment budgétaires, mis en œuvre.
- Renforcer sensiblement les moyens consacrés au pilotage de la R & D dans les technologies de l'énergie au ministère en charge de la Recherche.
- Accroître la coordination interministérielle entre les ministères de la Recherche, de l'Industrie et de l'Écologie, et sans doute aussi de l'Équipement, des Transports et du Logement.

### Mise en œuvre

Ces deux dernières recommandations peuvent être mises en œuvre de différentes manières, en application des principes et traditions de l'organisation administrative française (comité, mission, délégation de caractère interministériel,...).

Le groupe de travail suggère qu'à tout le moins l'équipe en charge de la maîtrise d'ouvrage soit placée sous la supervision d'un comité d'orientation présidé par le directeur de la technologie et associant les directeurs d'administration centrale concernés des ministères en charge de l'énergie et de l'industrie, de l'écologie ainsi que des transports et du logement, compte-tenu des enjeux particulièrement importants dans ces deux secteurs d'activité. De cette façon, les principales orientations (répartition des moyens publics de R & D entre les usages et les offres de différentes natures, création de réseaux technologiques, approbation des contrats avec les organismes de recherche,...) pourraient être prises de façon collégiale et partagée.

Il suggère également que l'équipe en charge de la maîtrise d'ouvrage au sein du Ministère de la Recherche et des Nouvelles Technologies dispose de moyens humains sensiblement accrus (multiplication par deux ou trois des effectifs). Il s'agit moins de créer des postes nouveaux que de rechercher un meilleur équilibre entre les moyens affectés aux organismes publics de recherche, aux agences et à l'équipe centrale en charge de la maîtrise d'ouvrage. C'est l'intérêt même des agences et des organismes publics de recherche, sans parler des laboratoires privés, que cette maîtrise d'ouvrage soit suffisamment étoffée.

Cette équipe devrait, en effet, comme c'est déjà en partie le cas actuellement, proposer la création et faire assurer l'animation par les instances adéquates des réseaux transversaux qui organisent pour certaines technologies, comme la pile à combustible, la nécessaire coopération entre les représentants des organismes publics en charge de la recherche et des industriels concernés, depuis l'offre jusqu'à l'usage.

Enfin, une équipe renforcée garantirait mieux la lisibilité des actions de recherche conduites par les agences d'objectifs ou exécutées par les organismes publics de recherche, nécessaire au bon exercice de la tutelle de l'État.

Si le renforcement de cette équipe centrale, pourtant indispensable, s'avérait impossible, il pourrait être envisagé de mettre à sa disposition coté « offre » d'énergies (nucléaire, fossiles, renouvelables) une équipe supportée par le CEA et suffisamment autonome qui puisse jouer le rôle d'agence d'objectifs comme une partie de l'Adème le fait pour la maîtrise des usages de l'énergie. Cette proposition ne pourrait être mise en place sans une concertation préalable étroite avec les organismes en charge de la recherche.

Enfin dans les différentes configurations ici évoquées, il y a lieu de s'interroger sur le rôle de la MIES (Mission interministérielle de l'effet de serre) vis-à-vis de la R & D dans les technologies de l'énergie puisqu'un des enjeux essentiels de cette recherche vise la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et plus généralement des gaz à effet de serre.

## Conduite de la R & D en France

### Une organisation par programme

En ce qui concerne l'organisation de l'exécution de la Recherche, le groupe de travail n'a pas souhaité recommander des rectifications de frontière ou des fusions entre les organismes publics de recherche, ni même des suppressions. Il a clairement marqué sa préférence pour la mise en place de programmes structurés permettant l'alignement de la recherche publique et de la R & D privée sur des objectifs communs clairement définis, ce qui pourrait permettre à terme de voir évoluer les périmètres de compétences des organismes de recherche. D'autre part, la généralisation de l'approche par programme devrait permettre d'orienter davantage les recherches de chaque organisme, soit au travers de la subvention d'État lors de l'établissement des contrats pluriannuels et de la négociation budgétaire annuelle, soit à l'aide de crédits incitatifs au profit de programme précis.

### Domaine des usages de l'énergie

Pour les utilisations de l'énergie, le groupe recommande d'organiser la concertation des acteurs et la préparation de la programmation de la R & D en grands programmes dans chaque grand secteur (Transport, Habitat-Tertiaire, Industrie, voire Agriculture), en portant une attention particulière à ce que ne soient pas pris en compte seulement les objectifs de court terme et qu'une place suffisante soit faite aux recherches portant sur les discontinuités et les ruptures.

Sous la responsabilité générale du ministère de la Recherche, qui veillerait à leur bonne gouvernance, chaque programme bénéficierait de l'appui technique du ou des organismes publics de recherche compétents (ex : CSTB pour le secteur « Habitat-Tertiaire », INRA pour l'Agriculture) et disposerait d'un comité stratégique présidé par une personnalité éminente susceptible de promouvoir des partenariats de recherche publique-privée.

## Recommandations

---

Une tel programme est déjà à l'œuvre dans le domaine des transports, à l'intérieur du Prédit, dont il convient de poursuivre les activités en direction de la diminution des gaz à effet de serre.

Pour le secteur de l'habitat-tertiaire, ce programme devrait avoir pour objectif de long terme la réalisation du « bâtiment à énergie positive », qui suppose de nombreuses étapes intermédiaires, à commencer, pour le court terme, par l'incitation à utiliser les technologies actuellement disponibles

Dans le secteur de l'industrie enfin, il s'agira de décider si un tel programme de recherche-développement-innovation portant sur l'ensemble des gaz à effet de serre, devrait couvrir l'ensemble des industries grosses consommatrices d'énergie ou être organisé par secteur industriel comme le ciment, la sidérurgie, etc. La préférence du groupe va au deuxième dispositif.

Les engagements de réduction des gaz à effet de serre de ces industries sur la période 1990-2010 montrent que la plupart d'entre elles ont atteint, à technologie constante, et à prix d'énergie donné, un seuil dans leurs efforts d'économie d'énergie. Elles ont donc maintenant à développer, quand elles le peuvent, de véritables ruptures technologiques. Ceci suppose une analyse sérieuse de ces ruptures, la sélection des pistes les plus prometteuses et la mise en œuvre des programmes de recherche et développement correspondants.

68

Il conviendrait que l'Adème encourage ce type de recherche des ruptures possibles en les subventionnant au taux maximum et continue de soutenir la recherche sur les équipements génériques.

Les programmes de recherche consacrés à des technologies de ruptures économes en énergie pourraient s'effectuer ensuite dans le cadre de programmes européens (par exemple, Euréka) et/ou d'autres programmes internationaux.

### **Domaine de l'offre d'énergie**

Pour l'offre d'énergie, il conviendra, tout en poursuivant les actions engagées et sans préjuger d'autres initiatives pouvant être lancées, de mettre en place rapidement des programmes nationaux sur l'hydrogène et la séquestration du CO<sub>2</sub>, dans le cadre du dispositif mis en place par l'Union européenne.

En ce qui concerne l'hydrogène et compte tenu du lancement, sur une initiative américaine, d'un « partenariat international pour une économie de l'hydrogène », il est urgent que la France arrête dès que possible une stratégie et élabore en conséquence un plan d'action de recherche fondamentale et technologique susceptible d'être intégré dans la plate-forme européenne pour l'hydrogène

S'agissant de la séquestration du CO<sub>2</sub>, le groupe considère qu'un des objectifs principaux d'un programme national pourrait être la réalisation d'une installation de démonstration sur le territoire français, capable de fédérer les intervenants publics et privés de ce domaine, aujourd'hui dispersés. Le groupe souligne que la réussite de cette opération nécessiterait l'identification d'un industriel susceptible d'assumer le leadership d'un tel projet.

Enfin, le groupe considère que les biocarburants de synthèse et l'énergie solaire photovoltaïque mériteraient également qu'une fédération des forces de la recherche française intervienne en leur faveur.

### **Les régions**

Sans avoir eu les moyens matériels d'y consacrer le temps nécessaire, le groupe souligne l'importance de fédérer dans le domaine de l'énergie les initiatives qui sont prises par les collectivités locales en relation avec les établissements publics de recherche ou avec les universités.

### **Le rôle de l'Europe**

Le groupe de travail recommande de soumettre à la Commission européenne plusieurs propositions destinées à accroître l'importance et l'efficacité des crédits du PCRD affectés à la R & D dans le domaine de l'énergie et visant particulièrement la réduction des gaz à effet de serre :

#### **1. Le pilotage effectif de la R & D serait confié à l'Europe dans quatre domaines :**

##### **La fusion**

C'est déjà le cas et la qualité du pilotage de l'Europe dans le cadre de la coopération sur ce thème n'est pas contestée.

##### **L'hydrogène**

La constatation du retard de l'Europe par rapport aux USA et au Japon a conduit l'Europe à prendre l'initiative de créer une plate-forme technologique dans ce domaine. Plusieurs entreprises françaises ont des compétences et des intérêts à faire valoir au sein de cette plate-forme. Quatre représentants français issus des organismes en charge de la recherche et du monde industriel ont été nommés dans l'Advisory Committee, créé en décembre 2003.

Pour faire jeu égal avec les USA et le Japon et être capable de coopérer avec ces pays, l'Europe doit s'organiser de manière simple et efficace, ce qui ne paraît pas la voie suivie actuellement. Si les États membres acceptent ce leadership européen, une simplification de l'organisation devrait être possible.

##### **La séquestration**

Ce thème de recherche pourrait être organisé de manière similaire. Bien entendu, ses points d'application devraient tenir compte des contraintes géographiques et géologiques. Il est à noter que la France a demandé à participer à l'initiative américaine Carbon Sequestration Leadership Forum.

De façon sans doute assez différente :

## Recommandations

---

### Les réseaux électriques

Les accidents survenus aux États-Unis ou en Italie montrent que dans un contexte de libéralisation des marchés de l'électricité et de décentralisation des capacités de production, une recherche importante, qui n'est pas, loin de là, seulement de nature technique, doit être impulsée et financée par l'Europe et exécutée avec la participation des acteurs nationaux.

Dans ces quatre domaines, le pilotage et le financement de la R & D seraient assurés par l'Europe, ce qui suppose que les services de la Commission s'organisent pour le faire et que les États acceptent d'être mis en concurrence pour l'exécution des programmes. L'Europe devrait veiller à ce que la compétence sur chacun de ces thèmes ne se concentre dans un seul État-membre.

Dans les trois premiers domaines, au moins, l'action de l'Europe doit s'inscrire dans le cadre de la coopération internationale.

**2. L'Europe apporterait un concours aux programmes Euréka ayant pour objectif la maîtrise de l'énergie** (économie d'énergie et utilisation d'énergie à faible contenu carboné) dans les usages, dès lors que les entreprises concernées auraient organisé une coopération de niveau européen et développé un ou des « clusters » labellisés par l'organisation Euréka. À l'aide des États qui pourrait être plafonnée à 30 %, s'ajouterait par exemple une participation de 20 % du PCRD. Cet apport marquerait la reconnaissance par l'Europe d'un processus « bottom-up » apprécié par les industriels, allégerait le dispositif « top-down » dont la lourdeur, nécessaire pour garantir « l'égalité des chances », dissuade la recherche industrielle et compenserait les distorsions de concurrence qui vont résulter d'une application unilatérale du protocole de Kyoto par l'Europe. Un surcroît d'efficacité serait encore obtenu en confiant à l'État-membre de l'industriel-leader, l'apport de l'aide public à tous les partenaires, quelque soit leur État-membre d'origine et ceci grâce au concours de l'Europe. Cette solution éviterait de nombreux retards.

Le groupe de travail recommande également :

- de regrouper au niveau européen les crédits de R & D relatifs à l'énergie dans une seule direction générale pour assurer une meilleure cohérence dans l'utilisation de ces crédits,
- de prévoir dans le 7<sup>e</sup> PCRD un programme prioritaire sur l'énergie visant notamment la réduction des gaz à effet de serre.

L'ensemble de ces recommandations devrait être proposé à l'Union européenne qui y trouverait l'opportunité de développer de nouvelles responsabilités unifiées sur certains thèmes majeurs et en contrepartie de déléguer davantage la gestion d'une partie de ses aides.

## La contribution au développement

Enfin, parmi les enjeux d'une politique de R & D relative à l'énergie, le groupe de travail a retenu la contribution de la France à un développement énergétique faiblement émetteur de CO<sub>2</sub> des pays non encore complètement industrialisés. Il recommande donc d'inclure dans les programmes de R & D des recherches sur les techniques d'utilisation et de production de l'énergie appropriées aux ressources et aux besoins des PED de façon à conforter la position des entreprises françaises sur les marchés de ces pays.

Il recommande également de conduire certaines des actions de développement en partenariat avec certains PED (par exemple construction de pilotes expérimentaux sur leur territoire).

## Conclusions

La première partie du rapport énumère les neuf constats du groupe de travail qui caractérisent la situation actuelle et les défis que doit affronter une politique de recherche et développement dans les technologies de l'énergie pour répondre aux besoins futurs de notre pays dans une perspective de réduction drastique des émissions de CO<sub>2</sub> et au sein de l'Europe.

Les perspectives tracées par le Gouvernement pour lutter contre le changement climatique constituent un défi d'une ampleur sans doute encore mal perçue dans ses diverses conséquences et qui s'apparente à un changement de civilisation.

Alors que tout ou presque tout dans nos modes de consommation privilégie encore des produits, des services ou des pratiques de plus en plus consommateurs d'énergie (produits finis de plus en plus sophistiqués, conditionnés, papier plus blanc, verre plus transparent, habitat plus chaud l'hiver et plus frais l'été, déplacements plus individuels, transports juste à temps, véhicules climatisés plus lourds, plus énergivores comme les 4x4,...), nos concitoyens comme les entreprises devront découvrir progressivement les vertus de produits et de services nouveaux, moins consommateurs d'énergie pour l'ensemble de leur cycle de vie (du berceau à la tombe). Soyons conscient que la R & D ne trouvera pas d'issue à ses applications nouvelles si un consensus social ne se forme pas progressivement en faveur de cette nouvelle orientation indispensable pour réussir dans la lutte contre le changement climatique. Cette conviction justifie que soit poursuivi l'effort de recherche en sciences humaines et sociales et sans doute aussi en économie, piloté par le MEDD.

La seconde partie du rapport trace les grandes lignes de ce que devrait être les fondements d'une stratégie européenne de la R & D dans un contexte où les grandes catégories d'énergies (fossile, nucléaire, renouvelables) apparaissent plus complémentaires que concurrentes et sont chacune affrontées à des défis

## Recommandations

---

technologiques, économiques ou sociologiques (séquestration pour les fossiles, acceptabilité sociale pour le nucléaire, coût et disponibilité pour les renouvelables).

Dans un contexte d'incertitude aussi en ce qui concerne les vecteurs les plus appropriés: l'électricité et ses limitations actuelles dans le stockage; les combustibles liquides commodes d'emploi mais générateurs d'émissions diffuses de CO<sub>2</sub>; la vapeur ou l'eau chaude limitées dans leurs utilisations; l'hydrogène dont la généralisation peut difficilement être envisagée au cours du premier quart du siècle.

Dans un contexte enfin qui privilégiera davantage la génération décentralisée d'électricité que dans le passé.

Au niveau de l'Europe, toutes les pistes doivent être considérées et, au premier chef, celle de la maîtrise des consommations grâce à l'amélioration des rendements dans les usages, à l'emploi des nouvelles technologies, de l'information et de la communication et sans doute aussi grâce à de nouveaux comportements susceptibles de limiter la consommation et plus encore peut-être les crêtes.

Dans ce cadre, la France doit jouer un rôle actif qui tienne compte de ses moyens et de ses ambitions, compte tenu de ses capacités propres dans la R & D, dans la production d'énergie et dans l'industrie.

Comme l'Europe, elle doit accorder une vraie priorité à la recherche-développement nécessaire pour progresser dans la maîtrise de la consommation (économie d'énergie et utilisation privilégiée d'énergies à faible teneur en carbone) dans tous les secteurs, les transports au premier chef, l'habitat-tertiaire mais aussi l'industrie pour maintenir sa compétitivité. Il convient sans doute de multiplier par deux ou par trois les crédits publics et privés affectés à cette recherche.

Dans le domaine de l'offre et des vecteurs, la France doit privilégier les recherches dans les domaines où elle occupe une position forte, et différenciée et bénéficie d'atouts spécifiques comme le nucléaire, l'électricité ou la biomasse et les biocarburants.

Sans être forcément en position de leader, la France doit être en mesure de maîtriser dans le futur, directement ou indirectement, des technologies comme l'hydrogène et la pile à combustibles, ou la séquestration du carbone. Elle doit donc aussi participer aux programmes européens de recherche engagés dans ces domaines.

Pour conclure, cette action de recherche sur les nouvelles technologies d'utilisation et de production de l'énergie visant notamment à lutter contre le changement climatique présente des caractéristiques nouvelles qui justifient une organisation particulière.

## Recommandations

---

L'objectif est connu : diviser environ par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 2000 et 2050. C'est un objectif de long terme mais la tendance, surtout dans les transports, est à contre-courant. Il faut l'inverser le plus vite possible.

C'est l'honneur des chercheurs du monde entier d'avoir pressenti puis confirmé le risque de changement climatique. Ils partagent maintenant la responsabilité de trouver les voies d'un retour à l'équilibre. Cette nouvelle mission illustre leur rôle essentiel au service de la collectivité une politique de recrutement et de formation adaptée à ces nouveaux enjeux devra être conduite.

En même temps, il n'est pas possible de prévoir maintenant tout ce qui va se passer pendant cette période. Il faut donc mettre en place un système de management de niveau européen et de niveau national qui permettra d'engager une recherche beaucoup plus ambitieuse et de l'adapter au fur et à mesure qu'un certain nombre d'hypothèses seront levées.

Les membres du groupe de travail ont la conviction que si l'on continue sur la base du dispositif actuel, non seulement la France n'atteindra pas les objectifs qu'elle s'est fixés, mais encore sa compétitivité économique sera gravement et peut-être irréversiblement affectée.



# **Annexes**

---



# Annexe I:

## lettre de mission

---

Le ministre de l'Économie,  
des Finances  
et de l'Industrie

La ministre de l'Écologie  
et du Développement  
durable

La ministre déléguée  
à la Recherche  
et aux Nouvelles  
Technologies

La ministre déléguée  
à l'Industrie

Paris, le

Monsieur le Président,

L'augmentation inéluctable de la consommation énergétique mondiale constitue l'un des défis majeurs des prochaines décennies. Il nous faudra apprendre en premier lieu à maîtriser la demande énergétique, mais également à trouver les moyens d'y faire face dans des conditions satisfaisantes pour le développement économique et pour l'environnement, en particulier pour contenir le réchauffement climatique.

Nous sommes convaincus que des innovations scientifiques et technologiques, voire des ruptures, sont nécessaires pour y parvenir. La maîtrise de ces nouvelles technologies pour la production et l'utilisation de l'énergie est un enjeu stratégique pour notre pays. C'est un gage de compétitivité de notre économie et de nos entreprises.

Compte tenu des délais nécessaires aux mutations et du poids des investissements dans les domaines énergétique et industriel, il nous faut engager dès à présent et sur le long terme un effort de développement ambitieux de ces nouvelles technologies de l'énergie. Pour être efficace, il suppose une concertation étroite entre les entreprises et les organismes de recherche et des programmes concertés ambitieux, rythmés par des applications concrètes. Il devra également tenir compte des efforts réalisés par nos partenaires européens.

Nous avons décidé de mettre en place un groupe de travail chargé d'identifier des objectifs et des axes de priorité pour la recherche française et européenne et de proposer des recommandations sur l'évolution des dispositifs de soutien à la recherche et à l'innovation pour atteindre ces objectifs. Les travaux du groupe s'appuieront sur des états des lieux et enquêtes sur les technologies existantes ou en cours de développement, les programmes de recherche et sur les exercices de prospective énergétique et scientifique.

Ce groupe sera principalement composé de représentants du monde industriel et des organismes de recherche. Au regard de votre expérience industrielle et opérationnelle, nous souhaitons vous en confier la présidence. Nous souhaiterions pouvoir disposer de ses conclusions et recommandations pour la fin du mois de novembre 2003.

Nous vous prions de croire, Monsieur le Président, à l'assurance de notre considération distinguée.

Francis Mer

Roselyne  
Bachelot-Narquin

Claudie Haigneré

Nicole Fontaine

# Annexe II: composition du groupe de travail et liste des personnalités consultées

---

## Président du groupe de travail

M. Thierry Chambolle, conseiller du président de Suez pour le développement durable

## Rapporteur du groupe

M<sup>me</sup> Florence Méaux, conseiller référendaire à la Cour des comptes

## Consultant

M<sup>me</sup> Véronique Lamblin, directeur des études de prospective et de stratégie, Futuribles

## Membres du groupe

M. Richard Armand, délégué général, Association des entreprises pour l'environnement (EPE)

M. Yves Bamberger, directeur de la recherche EDF

M<sup>me</sup> Patricia Blanc, chef du bureau de la Pollution atmosphérique, des Équipements énergétiques et des Transports, ministère de l'Environnement et du Développement durable

M. Pierre Castillon, ancien président fondateur de l'académie des technologies

M. Philippe Court, chef du bureau 4C « R & D » direction du Budget, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

M. Thierry Damerval, directeur de la Stratégie et de l'Évaluation, Commissariat à l'énergie atomique

M. François Demarcq, directeur général, Adème

M. André Douaud, directeur technique, Comité des constructeurs français de l'automobile

M<sup>me</sup> Dominique Dron, présidente, Mission interministérielle de l'effet de serre

M. Jean-Jacques Doyen, Suez

M. Marc Florette, directeur de la Recherche, GDF

M. Édouard Freund, directeur général adjoint, Institut français du pétrole

M. Bernard Frois, directeur de l'Énergie, des Transports, de l'Environnement et des Ressources naturelles, ministère délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies

M. Philippe Garderet, directeur de l'Innovation, Aréva

M. Claude Jablon, directeur scientifique, TotalFinaElf

M. François Jackow, directeur de la Recherche et du Développement, Air Liquide

M. Jean Lamberti, directeur de l'Environnement, Rhodia

M. Jean-Claude Lehmann, directeur de la Recherche, Saint-Gobain, président de l'académie des technologies

## Annexe II: composition du groupe de travail et liste des personnalités consultées

---

M. Jean-Claude Loisy, TotalFinaElf

M. Jacques Lukasik, directeur de la Recherche, Lafarge

M. Alain Maugard, président, Centre scientifique et technique du bâtiment

M. Gérard Megie, président, Centre national de la recherche scientifique

M<sup>me</sup> Gaelle Monteiller, directrice des Affaires publiques et de l'Environnement, Lafarge

M. Jean-Eudes Moncomble, secrétaire général, Conseil français de l'énergie

M. Pierre Radanne, chargé de mission, Mission interministérielle de l'effet de serre

M<sup>me</sup> Michèle Rousseau, directrice, direction de la Demande et des Marchés énergétiques, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

M. Germain Sanz, ancien directeur de l'Innovation, Arcelor, membre de l'académie des technologies

M. Bernard Tinturier, conseiller scientifique auprès du président, EDF

### **Outre les membres du groupe les personnes suivantes ont été consultés pour l'élaboration de ce travail:**

M. François Ailleret, Conseil français de l'énergie

M. Olivier Appert, IFP

M<sup>me</sup> Nathalie Alazard-Roux, IFP

M. Christian Balmes, société des Pétroles Shell

M. Alain Bayet, direction de la Prévision, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

M. Christian Béchon, cabinet du ministre de l'Industrie

M. Becker, direction de la Prévision, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

M. Jean-Louis Beffa, Saint-Gobain

M. Jean Besson

M. Pierre Beuzit, Renault

M. Pierre Bilger (a présidé le groupe de travail pour la première partie de ses travaux)

M. Christophe Blanc, direction de la Prévision, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

M. Alain Bugat, CEA

M. Alain Carrière, GDF

M<sup>me</sup> Martine Choquert, DGEMP, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie

## Annexe II: composition du groupe de travail et liste des personnalités consultées

---

M. François Clin, direction de la Technologie, ministère de la Recherche  
M. Bertrand Collomb, Lafarge  
M. Pascal Dupuis, DGEMP, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie  
M. Hugh Elliott, ambassade de Grande-Bretagne à Paris  
M. Bernard Equer, direction de la Technologie, ministère de la Recherche  
M. Jean-Martin Foltz, Peugeot  
M. Bernard Frois, ministère de la Recherche  
M. Pierre Gadonneix, EDF  
M. Jean-François Giannesini, IFP  
M. Jean-Paul Jacamon, Eureka  
M<sup>me</sup> Agnès Jacquesy, direction de la Technologie, ministère de la Recherche  
M. Christophe Jurczak, DGEMP, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie  
M. Karl Kellner, Commission européenne  
M. François Laurent, direction de la Technologie, ministère de la Recherche  
M<sup>me</sup> Anne Lauvergeon, Aréva  
M. Richard Lavergne, Observatoire de l'énergie du ministère de l'Industrie  
M. Jean-Marc Lepeu, Renault  
M. Robert Mahler, Alstom France  
M. Dominique Maillard, DGEMP, ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie  
M. Michel Matheu, direction de la Stratégie d'EDF  
M. Jean-Marc Mérillot, Adème  
M<sup>me</sup> Michèle Pappalardo, Adème  
M. Poireau, Commission européenne  
M. Pussieux, direction de la Technologie, ministère de la Recherche  
M. François Roussely, EDF  
M. Louis Schweitzer, Renault  
M. Trouvé, direction de la Pollution, de la Prévention et des Risques, ministère de l'Écologie  
M. Ludovic Valadier, direction de la Technologie, ministère de la Recherche  
M. Pierre Valette, Commission européenne  
M. Jacques Varet, BRGM

# ANNEXE III:

## état des ressources des énergies primaires

---

### Au XXI<sup>e</sup> siècle

#### Le pétrole

Les réserves prouvées de pétrole sont d'environ 140 Gt et la consommation mondiale actuelle est de 3,5 Gt par an. Ce qui permet de dire que les réserves sont d'environ 40 ans de consommation, à consommation inchangée. La majorité des experts considèrent que l'amélioration des taux de récupération du pétrole des puits, de nouvelles découvertes et l'utilisation de pétroles non conventionnel (huiles extra-lourdes, sables asphaltiques et schistes bitumineux) permettront une consommation croissante pendant encore 40 à 80 ans.

Pourtant d'autres experts <sup>(23)</sup>, plus pessimistes, considèrent que les données de réserves issues des agences officielles sont erronées. Ils estiment que la production de pétrole (conventionnel et non conventionnel) atteindra un maximum physique de production dans 20 ans avec l'accroissement prévu de la consommation. Leurs arguments principaux sont que nous consommons plus de pétrole que nous n'en découvrons depuis 20 ans et que l'extraction de brut de pétroles non-conventionnels tels que les sables bitumineux de l'Athabaska et les huiles extra-lourdes de l'Orénoque a déjà commencé. Tout le monde s'accorde pour penser que la dépendance vis-à-vis du Moyen Orient, qui détient 65 % des réserves prouvées, devrait s'accroître.

#### Le gaz naturel

Les réserves prouvées de gaz naturel sont de 155 Tm<sup>3</sup> et la production annuelle est d'environ 2,5 Tm<sup>3</sup>. Les réserves sont donc de plus de 60 ans à consommation inchangée et l'on trouve chaque année plus de gaz que nous n'en consommons. Mais si l'on remplaçait le pétrole et le charbon par le gaz pour réduire les émissions à effet de serre, les réserves ne seraient plus que de 17 ans. Les plus pessimistes des experts n'envisagent pas de contrainte sur l'accroissement de la production de gaz naturel avant 2040, cependant l'abandon du nucléaire au profit du gaz par certains pays pourrait accélérer la consommation des ressources. La plus grande partie des réserves de gaz se trouvent dans l'ex-URSS (près du tiers) et au Moyen Orient. D'énormes quantités de méthanes sont stockées sous forme d'hydrates dans les zones polaires et en eaux très profondes mais pour certains ces réserves sont trop dispersées pour être récupérables et pour d'autres <sup>(24)</sup> l'exploitation commerciale de ces gisements n'est pas envisageable avant 2030, voire 2050.

#### Le charbon

Le charbon est le combustible fossile dont les réserves sont les plus abondantes. Celles-ci sont surtout localisées aux États-Unis (28 %), en Russie (23 %) et en Chine (11 %). La disponibilité de ressources en charbon bien au-delà de 2050 n'est pas controversée. Le ratio réserves sur production actuelle est de 230 ans.

---

<sup>(23)</sup> J. Laherrère, géologue et géophysicien qui a été en charge des techniques d'exploration pour la compagnie Total pendant de nombreuses années; Colin Campbell, ancien géologue de Texaco, d'Amoco puis vice-président de Fina-Norvège; Walter Younquist, ancien géologue d'Exxon et d'autres.

<sup>(24)</sup> La lettre de la direction générale de l'Énergie et des Matières premières, n° 20- 2<sup>e</sup> trimestre 2002, p. 25.

## ANNEXE III: état des ressources des énergies primaires

---

### L'uranium

Les ressources classiques connues d'uranium s'élevaient en 1999 à près de 4 millions de tonnes (les ressources découvertes et spéculatives d'uranium s'élèvent, selon le CEA à 17 millions de tonnes) et la consommation annuelle mondiale est de 60 000 tonnes. Les ressources connues représentent donc environ 70 ans de réserves pour les réacteurs à neutrons lents si la consommation n'augmente pas. Avec des réacteurs à neutrons rapides (surgénération), qui permettent d'extraire beaucoup plus d'énergie du combustible, ces réserves seraient suffisantes pour des milliers d'années. La répartition des ressources d'uranium est très différente de celle des énergies fossiles. L'Australie détient le quart des réserves prouvées, le Kazakhstan et l'Amérique du Nord en détiennent chacun de l'ordre de 17 %. Par ailleurs un autre système de combustible peut être envisagé pour la fission nucléaire contrôlée: le thorium 232-uranium 233. Le thorium présente l'avantage d'être trois à quatre fois plus abondant que l'uranium sur la terre avec une bonne répartition.

### L'hydraulique

La contribution annuelle de l'hydraulique à la production électrique en France est de 70 TWh/an pour une capacité installée de 25 GW. Cette production est proche du maximum techniquement faisable à ce jour qui est de 72 TWh (la production théorique est de 200 TWh).

Si le potentiel hydraulique français est largement utilisé, le potentiel mondial pourrait être davantage exploité: une étude du Programme des Nations Unies pour le Développement <sup>(25)</sup> indique que la production mondiale actuelle de 2645 TWh, avec une capacité installée de 700 GW, pourrait passer à 8100 TWh à horizon 2050 avec un doublement économiquement compétitif de la capacité actuelle. 14 000 TWh seraient techniquement exploitables et le potentiel théorique mondial serait de 36 000 TWh.

Quant à la mini-hydraulique, la production en France est de 4,6 TWh/an (source EDF, mais l'Adème annonce une production moyenne de 7 TWh/an avec une définition pourtant plus restrictive: centrales de puissances inférieures à 8 MW pour la conception française et inférieur à 10 MW selon la norme européenne) et la capacité installée est de 2 GW (idem selon les sources). Le potentiel encore techniquement exploitable serait de 4 TWh/an provenant pour un tiers de l'amélioration des installations existantes et pour les deux-tiers restant de nouvelles installations. Cependant le classement d'un nombre important de cours d'eau, sous la pression des associations de pêche, empêche aujourd'hui l'implantation de nouvelles installations. La production européenne est actuellement de 40 TWh et pourrait croître à 50 TWh à horizon 2010<sup>(26)</sup>. L'Espagne est le pays qui présente le plus gros potentiel.

### Le solaire

La durée de vie du soleil est d'environ 5 milliards d'années ce qui en fait à notre échelle une énergie inépuisable donc renouvelable. La puissance moyenne reçue du soleil par la terre est d'environ 20 % du flux lumineux compte-tenu du jour et de la nuit, de la latitude de l'endroit, des saisons et de la couverture nuageuse. L'ensoleillement reçu en France représente de l'ordre de 4 kWh/m<sup>2</sup>/jour, 3 kWh/m<sup>2</sup>/jour à Lille et 5 kWh/m<sup>2</sup>/jour à Nice.

---

<sup>(25)</sup> Hydropower and Dams World Atlas 2001.

<sup>(26)</sup> Source Fiche EDF du « Débat sur l'énergie », février 2003; estimation de Frost et Sullivan de 2002 pour l'Europe.

## ANNEXE III: état des ressources des énergies primaires

---

Avec les techniques commercialisées aujourd'hui il faut 10 m<sup>2</sup> de modules photovoltaïques pour obtenir 1 kW de puissance et 1 000 kWh par an, le rendement moyen des cellules photovoltaïques en silicium cristallin est de 15 % mais le rendement réel de ces cellules est plus proche de 10 % car il diminue lorsque la température augmente. Cela signifie pourtant que si les 10 000 km<sup>2</sup> de toitures existantes étaient utilisées comme générateur solaire, la production serait de 1000 TWh par an soit plus du double de la consommation annuelle finale d'électricité en France (450 TWh).

Les principaux freins à l'utilisation massive du solaire photovoltaïque (et thermique) sont la disponibilité (seulement le jour et moindre en cas de temps nuageux) de la puissance fournie qui contraint au stockage de l'électricité dans des batteries pour une utilisation autonome ou à l'utilisation de solutions énergétiques complémentaires, d'une part et la compétitivité économique, d'autre part. Pour le solaire thermique, selon l'Adème: le bon ensoleillement du territoire, y compris dans le nord du pays, permet de couvrir de 40 à 70 % des besoins cumulés en eau chaude sanitaire et en chauffage.

### L'éolien

La ressource éolienne disponible est évaluée à l'échelle mondiale à 57 000 TWh par an (accessibles dans les conditions techniques connues à ce jour et avec une contribution de l'éolien off shore de 25 000 à 30 000 TWh par an en se limitant aux sites dont la profondeur n'excède pas 50 m).

L'Europe ne représente que 9 % du potentiel éolien disponible dans le monde mais 72 % de la puissance installée en 2002, elle produit 50 TWh par an d'électricité d'origine éolienne en 2002. La production mondiale est de 70 TWh/an en 2002. La ressource éolienne techniquement disponible en Europe serait de 5 000 TWh par an.

Pour la France, le potentiel technique de l'éolien terrestre (10 % des surfaces où la vitesse moyenne du vent est supérieure à 6 m/s) est de 30 GW pour produire 66 TWh/an; celui de l'éolien off shore (zones à moins de 30 km des côtes et à moins de 30 m de profondeur) est aussi de 30 GW mais pour une production de 90 TWh/an. Techniquement, l'énergie éolienne pourrait donc fournir le tiers de l'électricité consommée en France. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'instabilité du vent. Les périodes de grand froid, comme de canicule, qui se traduisent par une demande accrue d'énergie s'accompagnent fréquemment de pannes de vent.

### La géothermie

Il existe trois sortes d'énergies géothermiques dont les manifestations et les utilisations sont très différentes.

Les géothermies classiques de haute énergie (hautes températures en contexte volcanique comme la centrale de Bouillante en Guadeloupe) et basse énergie (plus basses températures entre 50 et 100 °C d'aquifères sédimentaires comme ceux des Bassins parisien et aquitain:), exploitent la chaleur d'hydrosystèmes souterrains.

La géothermie dite « des roches chaudes et sèches » correspond à un concept plus récent et en cours de démonstration sur le site de Soultz-sous-Forêt en Alsace; Il s'agit là d'exploiter en très grandes profondeurs (supérieures à

## ANNEXE III: état des ressources des énergies primaires

---

5 000 m) des anomalies de fissuration du granit fournissant un « radiateur naturel » dont les échanges thermiques seront assurés par la mise en circulation de fluides indigènes ou non. ou de vapeur). Les gisements de roches chaudes et sèches représentent la majeure partie du potentiel géothermique mondial puisqu'il existe en tous points du globe des roches comme le granit qui atteignent des températures de 250 à 300 °C à 6000 mètres de profondeur. Mais la part de ce potentiel qui sera économiquement accessible reste à préciser. En théorie l'exploitation de la chaleur contenue dans une sphère de 1 km de rayon permettrait d'alimenter pendant un siècle une centrale électrique de 100 MW. Selon l'Adème le potentiel électrique des roches chaudes serait de 100 à 135 TWh par an en France et de 700 à 900 TWh en Europe.

Enfin les ressources géothermiques à très basse température (inférieure à 50 °C) sont présentes sur la quasi-totalité du territoire français, elles se valorisent avec des pompes à chaleur pour les besoins de chauffage. Ces ressources sont davantage considérées comme un outil de maîtrise de la consommation énergétique que comme une énergie primaire puisque son exploitation requiert de l'énergie électrique.

### **La biomasse**

La consommation de biomasse en France en énergie primaire est de 10-11 Mtep, principalement le bois. Sans culture énergétique spécifique le potentiel de la biomasse pourrait être doublé par une récupération systématique de tous les déchets organiques (étude de l'Adème et des cahiers du CLIP). Pour EDF, une valorisation de tous les déchets (déchets des ménagers et industriels non-recyclables, traitement par méthanisation des boues d'épuration et les déchets agricoles qui représentent plus de la moitié du potentiel pour la production électrique) le potentiel de production est de 1000 KWh électriques par habitant et par an soit 60 TWh/an soit 15 % de la consommation finale d'électricité actuelle.

Au niveau mondial, le recours à la biomasse est estimé à 11 % de la consommation d'énergie primaire, soit 1,2 Gtep, alors que le contenu énergétique de la production naturelle de la biomasse est estimé à 71 Gtep/an. La valorisation énergétique traditionnelle utilisée dans les pays du tiers-monde pour les besoins de base est de faible rendement.

### **Les biocarburants**

Un calcul théorique basé sur la production actuelle de biocarburant montre qu'il faudrait 5 à 6 Mha consacré à ces cultures pour fournir 25 % de la consommation nationale de carburants, sachant que 9Mha sont aujourd'hui consacrés à la culture des céréales et 1,3 Mha de terres sont en jachère.

### **Les autres énergies renouvelables**

L'usine de la Rance en Bretagne a démontré la possibilité d'utiliser l'énergie de la marée pour produire de l'électricité. L'énergie des vagues (1 W/m<sup>2</sup>, 50 kW/m de côte) est très diluée et pas encore exploitable économiquement. L'énergie thermique des océans est potentiellement 100 fois supérieure à celle des marées ou des vagues. Le principe est d'utiliser la différence de température entre la surface de l'océan (25 à 30 °C) et l'eau en profondeur (5 °C à - 1000 m). Pour être exploitable il faut que la différence de température soit supérieure à 20 °C mais le rendement est très faible: 2 %.

## ANNEXE III: état des ressources des énergies primaires

---

On peut également envisager de récupérer l'énergie solaire dans l'espace où les rayons solaires ne sont pas atténués par l'atmosphère terrestre. Les panneaux solaires placés en orbite géostationnaire reçoivent en moyenne huit fois plus de lumière solaire qu'au sol. Pour ramener cette énergie sur terre avec un rendement d'environ 50 %, on peut utiliser des micro-ondes. Il faut néanmoins que l'énergie véhiculée par le faisceau micro-onde soit suffisamment faible pour ne pas présenter de danger pour les êtres vivants et cela conduit à des surfaces considérables de radiopiles pour récupérer l'énergie.

# Annexe IV :

## un exemple de scénario tendanciel

---

Tout scénario quantifié visant à simuler l'évolution de la demande d'énergie est affecté de fragilité en raison de l'incertitude des données et de la difficulté des estimations. Néanmoins, à titre d'illustration et sans risque excessif d'erreur dans la longue période, les paramètres suivants ont été retenus pour les cinquante prochaines années (27) : une croissance économique proche de 3 % par an en moyenne (28), une population mondiale qui augmenterait au rythme de 1,3 % par an en moyenne (29), l'accès progressif à l'électricité des 1,6 milliards de personnes qui en sont encore privées aujourd'hui (30), les besoins croissants des pays en voie de développement et la mise en place de politiques d'économies d'énergie afin de protéger l'environnement.

### La répartition énergétique

L'offre d'énergie serait en 2030 toujours représentée à 90 % par les combustibles fossiles. À ce moment charnière le pétrole resterait dominant avec 34 %, suivi par le charbon 28 % et le gaz 25 %. Les énergies renouvelables et nucléaires représenteraient donc moins de 20 % (31).

La place du pétrole devrait commencer à diminuer à partir de 2030. Très difficile à estimer avec précision, la production du gaz devrait cependant doubler entre 2000 et 2030. Le charbon, malgré sa forte émission de CO<sub>2</sub>, devrait conserver une production élevée représentant près d'un quart de la consommation mondiale. Sa production devrait également doubler d'ici 2030 principalement en Asie et en Afrique. Il n'existe pas de limite aux réserves de charbon avant 2050 et certainement au-delà. Le charbon semble donc voué à rester une énergie de premier ordre avec un mouvement de balancier entre une réduction dans les pays de l'OCDE (hors USA) et une croissance dans les pays en développement.

Dans ce scénario, l'énergie nucléaire, seule énergie conventionnelle n'émettant pas de CO<sub>2</sub>, reste stable à 6 % de l'énergie consommée jusqu'en 2020/2030 et recommence à augmenter sa part relative au fur et à mesure de l'introduction des nouvelles technologies.

Les énergies renouvelables conserveraient une part voisine de 5 %, l'énergie hydraulique restant majoritaire en leur sein.

---

(27) Le scénario correspondant repose en partie sur les analyses présentées en annexe III.

(28) Taux moyen des cinquante dernières années.

(29) Taux moyen des cinquante dernières années : La population mondiale serait ainsi en 2030 supérieure à 8 milliards, en 2050 proche de 9 milliards.

(30) Selon ce scénario, au terme de la période il y aurait encore 1,4 milliards de personnes sans électricité, ce qui peut être considéré comme une estimation pessimiste et peut laisser penser que l'augmentation de la demande d'électricité qui en résulte peut être considérée comme prudente.

(31) Estimations fournies par la Commission Européenne en 2003.

## Annexe IV: un exemple de scénario tendanciel

### La répartition énergétique sur le long terme <sup>(32)</sup>

	2000		2020		2050	
	Gtep	%	Gtep	%	Gtep	%
Pétrole	3.7	40	5.0	40	3.5	20
Gaz naturel	2.1	22	4.0	27	4.5	25
Charbon	2.2	24	3.0	20	4.5	25
Total combustibles fossiles	8.0	86	12.0	87	12.5	70
Renouvelables	0.7	7.5	1	6.5	1.5	8
Nucléaire	0.6	6.5	1	6.5	4	22
<b>Total énergies</b>	<b>9.3</b>	<b>100.0</b>	<b>14.0</b>	<b>100.0</b>	<b>18.0</b>	<b>100.0</b>

### La répartition géographique

La répartition géographique de l'offre d'énergie ne devrait pas être substantiellement modifiée. Le Moyen-Orient fournirait toujours 30 % de l'offre mondiale, et 60 % du marché mondial. Plus particulièrement, l'Arabie Saoudite fournit 10 % de l'offre mondiale soit 20 % du commerce mondial, Iran et Irak 6 %, le Koweït et les Émirats Arabes Unis 5 %.

Enfin la croissance de la demande et l'épuisement des ressources rendraient l'Europe, le Japon et l'Asie du Sud-Est (à moyen terme les États-Unis) très dépendants des pays exportateurs. Les prix devraient donc évoluer en conséquence et atteindre des niveaux proches de 35 \$ par baril de pétrole, 28 \$ pour le gaz et 10 \$ par tonne de charbon en 2030.

<sup>(32)</sup> Estimations réalisées par Pierre René Bauquis, avec comme présupposé une croissance modérée de la population et une demande en énergie de 18 GTOE en 2050.

# Annexe V : rendements actuels et théoriques de la production d'électricité

Mode collectifs	Rendement de la meilleure techno X rendement filière de l'énergie primaire	Rendement techno futur	Émissions CO <sub>2</sub> /Kwh élec. du « puits au KWh consommé »
Centrales thermiques /cogén	Gaz (c. combiné): 53 % X 92 %	60 % en 2030	400 (350+50)
	Charbon (IGCC): 44 % X 98 %	50 % en 2030	800 (760 + 40)
	Biomasse: 15 % X 30 à 50 %	35 % (IGCC) à court terme	Négligeable
Nucléaire	34 % X 98 %	36 % (EPR, 2020), 50 % (Gén IV, 2040)	Négligeable
Hydraulique	75 %		Négligeable
Géothermie (roches sèches)	13 %		Négligeable
Éolien	30 à 40 %	Max Th: 59 %	Négligeable
Solaire Thermodyn.	10-15 %		Négligeable sauf couplage gaz
Marine Marée-motrice Houle	Selon la taille du bassin ?		Négligeable
Cogén moteurs/ Turbine	Diesel: 50 % x 92 % Gaz: 30 à 36 % X 92 % et cogen 85 %	Turbine 30 à 35 % en 2020 Moteur 36 à 40 %	450 (400 + 50) pour th + él.
PAC BT + refor. PAC HT	Gaz: 55 % X 80 % X 92 % cogen 80 % Gaz: 53 % X 92 % cogen 80 %	53 à 60 %	idem, émissions polluants << moteurs/turbines
Éolien	30 à 40 %	Max Th: 59 %	Négligeable
Photovoltaïque (PV)	15 %	Max: 25 et 30 % selon Si	Négligeable
Thermo-électrique	10 %		Négligeable
Paraboles solaires thermodyn		20-25 % en 2005	O sauf si couplé au gaz

# Annexe V: rendements actuels et théoriques de la production d'électricité

## Rendements de la production de chaleur

Mode collectifs rendement filière	Rendement de la meilleure techno X	Émissions CO <sub>2</sub> g/Kwh th. du « puits au Kwh consommé »
Chaufferies	Tout combustible de 80 à 85 % Bois: 80 %	Négligeable
Géothermie basse T°	> 80 %	Négligeable
<b>Modes individuels</b>		
Chaudière Fuel	70 % X 88 %	330 (260 +70)
Chaudière Gaz	70 % X 92 %	250 (200 + 50)
Inserts bois	50 %	Négligeable
Pompes à chaleur	1 kWh e = 3 à 6 kWhth	CO <sub>2</sub> /6 en France
Solaire thermique	40 % (sud de la France)	Négligeable
Cogen* turbine gaz	85 à 87 % X 92 %	250
Cogen* PAC BT et HT	80 à 90 % X 92 %	250

# Annexe VI: nécessité de ne renoncer à aucune source d'énergie

---

Que ce soit en raison de contraintes politiques, de limitations techniques ou de considérations économiques, l'offre énergétique ne pourra que rester diversifiée. Le progrès technologique au niveau mondial ne pourra faire l'impasse sur aucune des filières accessibles sauf à compromettre à terme la sécurité de l'approvisionnement en énergie.

## Le pétrole

En considérant que l'ensemble des ressources fossiles resteront abondantes, la dépendance de l'Europe vis-à-vis du pétrole et du gaz fait problème dans le long terme. Comme le souligne le livre vert de la Commission <sup>(33)</sup>, les combustibles fossiles représentent les 4/5<sup>e</sup> de la consommation européenne et les 2/3 sont importés. L'offre communautaire d'énergie couvre à peine la moitié des besoins communautaires. Si rien n'est entrepris d'ici 2030, le poids des combustibles fossiles va s'accroître. Les importations d'énergie seront bien plus lourdes d'ici trente ans et s'élèveront à 70 % des besoins globaux. Le pétrole pourrait être importé à concurrence de 90 %.

Le secteur du transport dépend quasi-exclusivement du pétrole et la compétition mondiale est engagée vis-à-vis de cette ressource qui se concentrera inexorablement au Moyen Orient.

## Le gaz

Le gaz est un peu mieux réparti dans le monde et l'Europe bénéficie de l'approvisionnement de l'ex-URSS (20 % de la consommation européenne). Mais l'Europe pourrait avoir à partager cette ressource avec les États-Unis et avec la Chine. Des accords de fourniture énergétique de la Russie à ces deux pays, dont la consommation est effectivement ou potentiellement très importante, sont à l'étude.

## Le charbon

L'usage de charbon, pour incontournable qu'il soit sur une bonne partie de la planète, pose plus que toute autre énergie fossile le problème de la séquestration du CO<sub>2</sub>.

En effet pour produire un kWh, le charbon émet un peu moins du double d'émissions de gaz carbonique que le gaz naturel. Parmi les options de stockage, les réservoirs épuisés de pétrole et de gaz permettraient de stocker 920 milliards de tonnes de gaz carbonique, selon l'Agence internationale de l'énergie, soit 45 % des émissions prévues de 2000 à 2050, toutes énergies primaires confondues, dans le scénario tendanciel de l'IPCC (IS92a « business as usual »).

L'autre grande option est le stockage dans des aquifères salins de grande profondeur <sup>(34)</sup> dont la capacité est incertaine variant de 20 à 500 % des émissions jusqu'en 2050 (selon les mêmes sources).

---

<sup>(33)</sup> Rapport final sur le Livre vert « Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique » Communication de la Commission au Conseil et au Parlement européen, juin 2002.

<sup>(34)</sup> D'autres options comme le stockage au fond des océans ou la solidification du CO<sub>2</sub> par électrolyse produisant de la chaux éteinte (CaCO<sub>3</sub>) pour le précipiter au fond de l'océan sont en cours d'étude.

## Annexe VI: nécessité de ne renoncer à aucune source d'énergie

---

Or le coût du stockage, évalué aujourd'hui entre 30 et 80 \$ par tonne de CO<sub>2</sub>, conduirait à une augmentation du coût du kWh produit à partir de charbon de 40 à 70 % (le surcoût serait de 50 % par kWh produit à partir de gaz naturel); le coût de l'électricité produite à partir de charbon serait alors de l'ordre de celui de l'éolien terrestre actuel.

### Le nucléaire

Le nucléaire est aujourd'hui la voie de production de masse d'électricité la plus rentable sans émissions de gaz carbonique.

Mais pour que les transports qui utilisent, par exemple, près d'un tiers de la consommation énergétique finale en France puissent évoluer massivement vers la technologie électrique, vecteur indispensable pour utiliser le nucléaire, des progrès décisifs dans la capacité de stockage de l'électricité embarquée et de temps de recharge sont nécessaires.

L'inertie des démarrages et des arrêts des tranches de tranches d'une centrale et la nécessité d'optimiser des coûts d'investissement et de maintenance élevés (que la centrale produise beaucoup ou pas) conduisent à une régularité de fonctionnement optimale et planifiée. Ainsi, dans le monde <sup>(35)</sup>, les centrales nucléaires tendent à fournir les besoins électriques de base tandis que des centrales à énergie fossile ou l'hydraulique fournissent l'appoint lors de pointes de consommation. En effet, l'utilisation des centrales au gaz en période de pointe est économiquement intéressant, quand un parc nucléaire est implanté, puisque dans ce cas le coût du combustible représente 80 % du coût du kWh, alors que dans le cas du nucléaire le combustible ne représente que 15 % du coût de l'électricité.

Le manque d'acceptabilité sociale des risques (réels ou supposés) liés à l'utilisation du nucléaire a déjà conduit la Suède, l'Allemagne à s'engager dans un processus d'abandon progressif du nucléaire, tandis que la Finlande, la Corée et la Chine affichent leur détermination de poursuivre. Les besoins de réduction des émissions de gaz à effet de serre pourrait amener les premiers pays cités à revenir sur leur décision. Néanmoins le processus européen de libéralisation du marché de l'énergie pourrait être défavorable au nucléaire car le retour sur de tels investissements est particulièrement long pour des opérateurs privés qui ont d'autres solutions, d'une part. D'autre part, la gestion des centrales nucléaires par des opérateurs privés, associés aux yeux du publics à une compétition économique plus importante que des opérateurs publics, pourrait renforcer les craintes de la société vis-à-vis de ce type d'énergie.

Enfin dans les pays en développement dont les besoins d'accès à l'énergie sont considérables, le nucléaire n'est pas adapté aux zones à faible densité de population, à fortiori ne disposant pas déjà d'un réseau électrique. Les coûts fixes, le niveau technique de la maintenance nécessaire et le risque de prolifération font du nucléaire une technologie peu souhaitable pour les pays politiquement instables.

L'énergie nucléaire est cependant la voie la plus pragmatique (coûts actuels et quantité d'électricité fournie), pour les pays où sa sécurité de fonctionnement et la gestion des déchets est bien contrôlée, d'accroître fortement la production d'énergie sans émission supplémentaire de gaz à effet de serre.

---

<sup>(35)</sup> « La durée de vie des centrales nucléaires et les nouveaux types de réacteurs », Office Parlementaire des Choix Scientifiques et technologiques, mai 2003.

## Annexe VI: nécessité de ne renoncer à aucune source d'énergie

---

Les scénarios qui envisagent de se passer de l'énergie nucléaire tout en diminuant les émissions de CO<sub>2</sub>, que ce soit le scénario NOE <sup>(36)</sup> à l'échelle mondiale ou les simulations de pays européens <sup>(37)</sup> (Allemagne, Suisse, Pays-Bas...) sur des systèmes socio-économiques sobres en carbone avec des objectifs de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de -60 % à - 80 % de 1990 à 2050, font tous appel à une maîtrise massive de la consommation énergétique - difficilement accessible sans un changement radical et probablement régressif des habitudes de consommation - en complément du progrès technologique de production énergétique.

À titre d'illustration, pour la France, si l'on ajoute le potentiel maximal des productions électriques de la géothermie « roches sèches » (135 TWh), de tous les déchets (60 TWh), de l'éolien (150 TWh) et de l'hydraulique grosse et mini (80 TWh), la production totale serait de 425 TWh soit proche mais sans atteindre la consommation d'électricité de 2001 de 460 TWh. On peut donc conclure que sans une maîtrise conséquente de l'accroissement de la consommation énergétique, l'utilisation de l'énergie nucléaire sera incontournable.

### Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ne peuvent pas non plus à elle seules répondre de manière réaliste à tous les besoins énergétiques.

L'énergie solaire est intermittente (pas d'énergie la nuit et moins par ciel nuageux) et son potentiel est variable selon les endroits du globe. Elle permet de produire de la chaleur ou de l'électricité qui sont deux vecteurs énergétiques que l'on sait mal stocker (limite des batteries pour l'électricité) ou transporter (les pertes par effet joule d'un réseau électrique empêchent de transporter l'électricité au-delà de 1000 km).

L'énergie éolienne est elle-aussi intermittente (la vitesse des vents n'est pas constante) et tous les sites ne sont pas ventés également. Là aussi les limites du stockage électrique et de son transport réduisent le potentiel de valorisation de cette énergie.

Pour pallier le caractère intermittent et aléatoire de ces sources d'énergies, on peut imaginer de les utiliser en complément d'autres systèmes de production énergétique dont la ressource est stockable (biomasse, hydraulique de barrage, énergies fossiles) et en assurant une gestion plus volontariste de la courbe de charge (maîtrise de la demande d'électricité en termes de puissance et concept de « réseau intelligent »), ou encore d'utiliser l'électricité non consommée pour produire un autre vecteur énergétique comme l'hydrogène qui peut être stocké.

Mais le rendement énergétique de cette dernière filière serait faible: inférieur à 60 % pour les électrolyseurs industriels et un rendement de 50 à 55 % pour la pile à combustible, soit un rendement global de 30 % (sans compter le rendement éventuel de 75 % de compression de l'hydrogène pour le stocker).

Le potentiel de l'énergie hydraulique est physiquement limité tout comme celui de la biomasse dont un accroissement trop important de la production à des fins énergétiques viendrait concurrencer les besoins de nourriture pour l'homme ou le bétail. Ces ressources ont cependant la précieuse qualité de pouvoir être stockées.

---

<sup>(36)</sup> « Énergie un défi planétaire », Benjamin Dessus, Belin-Débats, 1999.

<sup>(37)</sup> « Que serait une société sobre en carbone ? Aperçus des programmes et réalisations à l'étranger ». Le Programme national de lutte contre le changement climatique. 2<sup>e</sup> Bilan et voies d'avenir, novembre 2002.

## Annexe VII: les dépenses de R & D des pays européens (données AIE 1999)

En millions d'euros	France	Pays européens
Nucléaire	517	833
<i>Fission</i>	490	621
<i>Fusion</i>	27	212
Fossiles	27	98
<i>Pétrole et gaz</i>	27	80
<i>Charbon</i>	0	18
Énergies renouvelables	11	236
<i>Solaire thermique</i>	1	22
<i>Photovoltaïque</i>	3	85
<i>Éolien</i>	2	48
<i>Biomasse</i>	4	52
<i>Géothermie</i>	1	5
Efficacité énergétique	11	195
<i>Industrie</i>	3	74
<i>Transport</i>	4	38
<i>Bâtiment</i>	3	66
<i>Autres</i>	1	17
Électricité	0	107
<i>Conversion</i>	0	63
<i>Transport distribution</i>	0	29
<i>Stockage</i>	0	15
Autres (dont hydrogène et pile à combustible)	0	89
Étude des systèmes énergétiques	0	27
<b>Total</b>	<b>566</b>	<b>1589</b>
<b>Total hors nucléaire</b>	<b>49</b>	<b>756</b>

# Annexe VIII: analyse des résultats du premier appel d'offres du 6<sup>e</sup> PCRD

---

## Généralités

Le 6<sup>e</sup> PCRD couvre les années 2003 à 2006. Il a un budget total de 12,905 Md€ ce qui représente 3,9 % du budget de l'Union européenne et 5 % des dépenses publiques de l'Union consacrées à la recherche.

Le 6<sup>e</sup> PCRD est significativement différent des précédents PCRD de par la volonté de la Commission à vouloir construire un espace européen de la recherche. Ceci se traduit par la volonté d'obtenir une masse critique en ressources, d'intégrer les efforts de recherche et rendre celle-ci cohérente à l'échelle européenne, d'où la création de nouveaux instruments: IP: projet intégré et NoE: réseaux d'excellence.

Le 6<sup>e</sup> PCRD a suscité un engouement fort avec environ 12 000 propositions reçues et près de 100 000 participants de plus de cinquante pays.

Revers de la médaille, moins d'un projet présenté sur 6 pourra bénéficier d'un financement. Les taux de succès des projets sont cependant assez variable selon les thématiques considérées de 11 % pour la priorité 3 nanotechnologies, à 36 % pour la priorité 5 sécurité alimentaire. La priorité 6 (qui contient les En R) obtient 24 %

La priorité 6 « développement durable, changement planétaire et éco-systèmes » avec un budget global de 2 120 M€, représente 16,42 % du PCRD

Pour le point 1<sup>(38)</sup> de la priorité 6 « systèmes énergétiques durables », le budget indicatif global (2003 - 2006) donné par la Commission serait de 810 M€ soit, 6,27 % du PCRD. Pour le 1<sup>er</sup> AAP (2003 - 2004), géré à la fois par la DG Transport Énergie et par la DG Recherche, le montant serait de 200 M€ pour la DG R et de 55 M€ pour la DG TREN.

À ce jour (négociations en cours) la France obtiendrait pour ce 1<sup>er</sup> AAP de la priorité 6.1 22,48 M€ de ce budget, soit 8,81 %.

## Analyse des premiers résultats:

Pour la DG Recherche, 238 propositions ont été jugées éligibles mais seulement 47 projets ont été retenus (la France est présente dans 21 de ces 47 projets soit 48,83 %).

La répartition thématique des 47 projets était:

– PAC: 4 projets (3 IP et 1 STREP). La France est présente dans 2 mais pas en coordination (le budget prévisionnel de l'aide demandé à la Commission serait de 24,145 M€).

– H2: 7 projets retenus (3 IP, 1 NoE, 2 STREPs, 1 SSA). La France est dans 6 dont 3 en tant que coordinateur (le budget prévisionnel de l'aide demandé à la Commission serait de 34,228 M€).

– Électricité: 4 projets la France est présente dans les 4 dont 3 en coordination (le budget prévisionnel de l'aide demandé à la Commission serait de 23,446 M€).

---

<sup>(38)</sup> Ce point regroupe les énergies renouvelables.

## Annexe VIII: analyse des résultats du premier appel d'offres du 6<sup>e</sup> PCRD

---

– PV: 10 projets retenus (2 IP, 5 NoE,...) la France est présente dans 7 et en coordonne 1 (le budget prévisionnel de l'aide demandé à la Commission serait de 33,539 M€).

– Biomasse: 9 actions, la France est dans un seul projet 1 Strep en négociation (Green fuel Cell: aide demandée 3 M€). (le budget prévisionnel total de l'aide demandé à la Commission serait de 41,674 M€ le budget le plus important).

– Autres EnR: 5 actions (le budget prévisionnel de l'aide demandé à la Commission serait de 34,900 M€). La France serait sur 1 action la géothermie de Soultz.

– CO<sub>2</sub>: 5 actions, la France serait présente dans 3 dont 1 en coordination (le budget prévisionnel de l'aide demandé à la Commission serait de 11 M€).

– Socio économique: 3 projets soutenus mais aucun français (le budget prévisionnel de l'aide demandé à la Commission serait de 7,346M€).

Le meilleur taux de réussite est obtenu par les industriels dans les IP car la France participe à 12 des 15 IP retenus.

Ce score paraît tout à fait honorable, mais si on fait une approche par montants financiers la France ne représenterait que 10 % des 200 M€ prévu pour ce premier AAP. L'Allemagne représenterait 27,35 %.

Mais il est encore impossible de connaître les montants financiers exacts.

Pour la DG TREN 113 propositions ont été jugées éligibles et 22 ont été retenues dont 8 à participation française (36,36 %). Un seul est à coordination française (sur les 10 déposées) ce qui fait un retour de 10 %.

Actuellement (nov.2003) 19 projets sont finalisés pour un montant d'aide de 39,088 M€ et 3 sont toujours en cours de négociation.

La France participera à 3 des 7 IP retenus, 3 des 3 CA et 2 des 9 STREP et aucun des 3 SSA. La DG TREN n'a pas demandé de réseau d'excellence, cet outil ne se prêtant pas aux projets de démonstration.

Si on fait une approche par montants financiers la France ne représente plus que 4,51 % des 55 M€ décidés par la DG TREN soit un montant de 2,48 M€.

# Annexe IX : les dépenses de R & D en France

## Par type d'organismes de recherche

En millions d'euros	CEA	Nature des recherches	Origine du financement
CEA	600	Nucléaire (95 %) - Photovoltaïque et stockage de l'énergie électrique - Hydrogène et pile à combustible - Efficacité énergétique et procédés industriels	Dotation budgétaire de l'État EDF Cogéma Framatome Autres coopérations industrielles Crédits incitatifs Adème (partie non nucléaire) : 3 M€ PCRD*
CNRS	70	Fusion - Déchets - Photovoltaïque - Biomasse - Hydrogène - Efficacité énergétique dans l'habitat - Solaire thermique - Biocarburants - Électricité - Chaleur - Pile à combustible - Moteur propre et économe - Séquestration du dioxyde de carbone	Dotation budgétaire de l'État Crédits incitatifs FRT** Crédits incitatifs Adème Coopérations industrielles PCRD*
IFP	240	Exploration gisement - Forage production - raffinage pétrochimie - Moteurs - Biocarburants - Biomasse - Hydrogène - Séquestration du dioxyde de carbone	Dotation budgétaire de l'État Coopérations industrielles Crédits incitatifs Adème : 1,7 M€ PCRD*
Autre établissements	30	BRGM sur la géothermie, CSTB sur le bâtiment, INRA pour la biomasse, INRETS pour les transports, CEMAGREF pour la chaîne du froid...	Dotation budgétaire de l'État Crédits incitatifs FRT** PCRD*
<b>Total</b>	<b>940</b>		

\*PCRD: programme cadre européen de recherche et développement;

\*\*FRT: fonds pour la recherche technologique

## Annexe IX: les dépenses de R & D en France

---

### Par nature de recherche

En millions d'euros		
Nucléaire	580	
<i>dont amélioration du programme actuel</i>	300	CEA et dans une moindre mesure CNRS
<i>Gestion des déchets</i>	185	
<i>Génération 4</i>	40	
<i>Fusion</i>	55	
Fossiles (dont séquestration)	230	IFP, CNRS, BRGM...
Énergies renouvelables (dont stockage de l'électricité)	50	CNRS, CEA, IFP, BRGM, INRA, IFREMER...
Efficacité énergétique	40	CNRS, CEA, IFP, CSTB, INRETS...
Hydrogène et pile à combustible	40	CNRS, CEA, IFP
<b>Total</b>	<b>940</b>	

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Les fiches qui suivent examinent les pistes de recherche sélectionnées par le groupe selon les critères qu'il a fixés.

## Efficacité énergétique dans les transports

Ont été classés dans cette catégorie de technologies :

- les moteurs à combustion interne avancée: technologie HCCI (homogeneous combustion control ignition) pour les moteurs diesels et technologie CAI (control auto ignition) pour les moteurs à essence ;
- les véhicules hybrides ;
- les véhicules électriques.

La pile à combustible, qui peut être considérée comme une technologie d'efficacité énergétique pour les transports, en raison d'un rendement meilleur que celui d'un moteur classique, a été examinée à part, car elle peut aussi concerner des usages stationnaires.

Le tableau ci-dessous concerne plus spécifiquement l'examen des technologies de véhicules électriques et hybrides. Il existe plusieurs schémas d'hybridation (en série, en parallèle et mixte) dont l'efficacité au plan énergétique et des émissions de CO<sub>2</sub> est différente, notamment au regard du type de parcours effectué (urbain ou interurbain). L'hybridation par elle-même permet de réduire les consommations de 40 % en cycle urbain. Le bilan CO<sub>2</sub> du véhicule hybride est amélioré par l'utilisation de carburants alternatifs d'origine renouvelable.

Pour le véhicule électrique, comme pour l'hybride rechargeable, le bilan est fonction du contenu CO<sub>2</sub> de l'électricité consommée.

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

Forte pour l'hybride  
L'hybridation permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 30 à 40 % par rapport aux véhicules classiques.

Pour le véhicule électrique, dépendant de la façon dont l'électricité utilisée a été produite.

---

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises.

Forte

Les véhicules hybrides peuvent constituer un marché mondial important à partir de 2010. D'autre part, la maîtrise de cette technologie prépare à celle de la pile à combustible, par apprentissage de la gestion de l'électronique de puissance dans les véhicules.

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Le marché des petits véhicules électriques est également potentiellement important, pour les usages citadins et certains marchés d'exportation.

---

Contribution à l'indépendance énergétique de la France

Forte

---

Contribution à l'adéquation offre/demande

Forte

---

Contribution au développement

Forte

---

### Faisabilité

Stade de développement et perspectives

En évolution

Certains constructeurs - notamment japonais - commercialisent déjà des modèles hybrides, qui demeurent cependant plus chers que des véhicules classiques. Ces véhicules pourraient se développer fortement après 2010.

Les véhicules électriques sont à un stade de développement moins avancé, en raison de leur limitation d'autonomie et de la durée de recharge des batteries.

---

Position actuelle de l'industrie française

Plus forte sur le véhicule électrique que sur le véhicule hybride.

Les deux constructeurs automobiles français commencent cependant à s'intéresser à cette seconde technologie.

Industriels potentiellement concernés: Peugeot, Renault, SNCF, Siemens Automotive, SNECMA, Valeo, Alstom Transport...

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Acceptabilité sociale

Non problématique pour l'hybride.

En l'absence d'un réseau électrique de distribution adapté, l'adoption du véhicule électrique par le grand public paraît lointaine.

---

## Efficacité énergétique dans le bâtiment

L'utilisation de nouveaux matériaux et une architecture adaptée conduisent à la réduction des besoins de chaleur et de froid. L'intégration des renouvelables dans la construction permet de substituer une production locale sans émissions de gaz à effet de serre à une production centralisée plus polluante. La cogénération permet d'exploiter à la fois l'électricité et la chaleur, ce qui entraîne une augmentation forte des rendements. L'adaptation temporelle de la chaleur et de l'électricité qui seront de façon croissante à la fois consommées et produites localement conduisent à disposer de systèmes de gestion locaux intelligents utilisables par les habitants et de méthodes de gestion de réseaux électriques multisources.

100

---

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Forte pour les renouvelables, les nouveaux matériaux et les dispositifs de gestion locaux.

Pour la cogénération dépend de la source alternative de production d'électricité.

---

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises

Forte pour le solaire thermique, les nouveaux matériaux, les dispositifs de gestion locaux et la cogénération dont le marché est en croissance forte.

Forte pour les PME qui installent ces produits dans le bâtiment.

---

Contribution à l'indépendance énergétique de la France

Très forte

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Contribution à l'adéquation offre/demande

Très forte  
En raison de la grande proximité entre les solutions développées et l'utilisateur final.

---

Contribution au développement

Forte  
Les programmes de bâtiments peuvent être exportés dans les pays en développement

---

## Faisabilité

Stade de développement et perspectives

Matériaux: le processus de recherche est incrémental et permet une intégration rapide des solutions performantes.

Intégration des renouvelables et cogénération: retard de développement fort de la France par rapport aux autres pays européens, possibilité de développement rapide.

Dispositif de gestion: très développé sur certaines applications (chauffage), possibilité de monter en puissance rapide pour la gestion de l'électricité.

---

Position actuelle de l'industrie française

Matériaux: forte

Intégration des renouvelables et cogénération: faible mais en progrès sensible.

Dispositif de gestion: moyenne pour la gestion du chauffage mais un grand potentiel pour la gestion de l'électricité et des autres applications avec notamment Legrand, Schneider, Somfy, D. Dore...

Industriels potentiellement concernés: Legrand, Bouygues, Saint Gobain, Schneider Electric, Lafarge Ciments, EDF, GDF, Suez

---

Acceptabilité sociale

Bonne

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Efficacité énergétique dans l'industrie

L'amélioration énergétique dans l'industrie implique d'agir selon deux axes, celui des procédés génériques et celui des procédés spécifiques.

Le premier s'adresse à l'ensemble des procédés et utilités nécessaires en base dans l'industrie: séparation de phases, séchage, broyage/concassage..., productions de vapeur, de froid, d'air comprimé... L'objectif est de favoriser, par la compétitivité économique et l'innovation, les solutions énergétiquement efficaces: technique membranaires, catalyse, moteurs électriques à vitesse variable...

Le second vise les procédés propres à des productions industrielles fortement consommatrices d'énergie dans les domaines de la sidérurgie, du ciment, de la chimie organique, du papier et carton, du sucre... Cette deuxième approche est aussi utilisée pour les gaz à effet de serre autres que le CO2. Pour ces procédés spécifiques, déjà très optimisés, les gains significatifs d'efficacité énergétique passe souvent par des évolutions lourdes, discontinuités et ruptures et en conséquence un effort significatif de R & D visant l'ensemble des GES impliqués.

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Significatif, eu égard à la contribution relative du secteur industriel.

Les deux axes d'intervention ont déjà démontré leurs résultats, en raison de la réactivité du secteur des entreprises.

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises

Forte,

À la fois pour les entreprises utilisatrices mais aussi pour les entreprises des équipements et celles de la maintenance

Contribution à l'indépendance énergétique de la France

limitée

Contribution à l'adéquation Offre/Demande

Forte, notamment par réponse rapide aux offres innovantes

Contribution au développement

Forte

---

## Faisabilité

Stade de développement  
et Perspectives

Fortes compétences en ingénierie  
industrielle, notamment procédés  
électriques

Gains rapides et continus pour les  
procédés génériques

Sauts pour les procédés spécifiques,  
en fonction des conditions économi-  
ques.

---

Position actuelle de l'industrie  
française.

Leadership et positions fortes :  
groupes internationaux dont équipe-  
mentiers.

Nécessité de consolider l'effort de  
R & D (partenariat public/privé)

Mettre l'accent sur des pistes en rup-  
ture technologique.

Industriels potentiellement concer-  
nés : Arcelor, Schneider Electric,  
Lafarge Ciments, EADS, Thales...

---

Acceptabilité sociale

A priori, pas de difficultés majeures  
supplémentaires.

---

## Biocarburants

Après plusieurs décennies de recherche, plusieurs carburants d'origine végétale ont été retenus. Ils se répartissent en deux grandes catégories : les composants tirés de l'huile - dont les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV), qui conviennent aux moteurs diesel - et les alcools - parmi lesquels l'éthanol et son dérivé l'ethyl tertio butyl ether (ETBE), qui convient aux moteurs à essence.

Dans la plupart des cas, l'EMHV (nom commercial Diester) est tiré du colza, mais il peut aussi être fabriqué à partir de tournesol. Il peut être ajouté au gazole dans des proportions variables, jusqu'à 30 % dans des flottes captives de véhicules. Il est ajouté à raison de 1 % dans beaucoup de gazole compte tenu de ses propriétés lubrifiantes afin de compenser le manque de qualité de lubrification des gazoles sans soufre.

L'éthanol n'est pas utilisé directement dans les essences servies à la pompe en France mais est régulièrement incorporé sous sa forme dérivée d'ETBE jusqu'à des taux de 10 %. Sa production est assurée essentiellement à partir de betterave et de blé.

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Les directives biocarburants, adoptées le 8 avril 2003 par le conseil des ministres de l'Union européenne prévoient qu'au 31 janvier 2005 2 % des carburants seront des biocarburants, ce pourcentage devant être porté à 5,75 % en 2010.

Pour la R & D, l'enjeu aujourd'hui est de transformer la biomasse entière, essentiellement lignocellulosique, par conversion thermochimique ou biologique. Il s'agit ainsi d'améliorer le potentiel de production d'énergie par hectare et le bilan CO2 au niveau de la production primaire.

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Moyenne, pour les biocarburants actuels, mais intéressante car contribuant à la diminution des émissions dans le secteur des transports.

Sensiblement améliorée par la transformation de la biomasse lignocellulosique.

---

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises

Significative

Bonne maîtrise industrielle des filières actuelles, Nécessité d'acquérir la maîtrise des filières lignocellulosiques.

---

Contribution à l'indépendance énergétique de la France

Moyenne à forte

Mais intéressante car permettant de diminuer la dépendance au pétrole.

---

Contribution à l'adéquation offre/demande

---

Contribution au développement

Importante

---

---

## Faisabilité

Stade de développement  
et perspectives

Technologie à maturité, pour les biocarburants actuels, mais nécessité d'améliorer leur compétitivité économique (trois fois plus cher que les carburants tirés du pétrole).

De nouvelles voies de fabrication peuvent permettre d'abaisser leur coût, moyennant un effort de recherche.

Technologie à développer pour les voies lignocellulosiques, passage au stade « pilote industriel. »

---

Position actuelle de l'industrie  
française

Les biocarburants représentent un débouché important pour l'agriculture française. La France est l'un des principaux producteurs européens de biocarburants, devancée seulement par l'Allemagne dans la production de biodiesel et par l'Espagne dans celle d'éthanol. Elle dispose d'une expertise sur toute la chaîne: un secteur agricole important permettant de fournir la matière première, mais aussi une compétence reconnue dans le traitement et la transformation des produits agricoles en biocarburants.

Industriels potentiellement concernés: SOFIPROTEOL pour le Diester...

---

Acceptabilité sociale

Non problématique

---

## Pile à combustible

Les piles à combustible sont des éléments électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique contenue dans un carburant directement en énergie électrique, sans combustion, avec un rendement élevé et de faibles émissions de GES.

La pile à combustible est envisagée dans trois grands domaines d'applications: le stationnaire (production d'énergie électrique et éventuellement de chaleur par cogénération), le transport, le portable (électronique, outillage, etc.)

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Le carburant utilisé pour faire fonctionner la pile peut être de l'hydrogène mais aussi du gaz naturel, du méthanol, de l'essence ou du bioéthanol, qui sont convertis en hydrogène dans un réformeur.

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Forte.

Selon le premier rapport du groupe à haut niveau relatif à l'hydrogène et à la pile à combustible, créé à Bruxelles en octobre 2002, 10 % de véhicules à PAC en remplacement des véhicules à essence représenteraient pour l'U.E., une économie de 40 Mt de CO<sub>2</sub> par an avec un hydrogène « propre » et 11 Mt de CO<sub>2</sub> si l'hydrogène est produit à partir de gaz naturel.

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises

Fort.

Le futur marché mondial des piles à combustible est estimé à environ 120 MdE à l'horizon 2020-2030.

L'enjeu compétitif est fort car la pile à combustible concerne de nombreuses applications et peut être un succès technologique indépendamment de l'hydrogène: elle peut en effet constituer une transition vers une économie de l'hydrogène ou devenir une solution définitive avec d'autres carburants.

Ses usages concernent potentiellement les secteurs de l'habitat et des transports.

Contribution à l'indépendance énergétique de la France

Moyenne

De nature à réduire la demande, compte tenu de l'amélioration du rendement par rapport à un moteur classique.

Contribution à l'adéquation offre/demande

Moyenne

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Contribution au développement

Forte

Les applications stationnaires peuvent être une solution intéressante pour répondre aux besoins des PVD.

---

### Faisabilité

Stade de développement et perspectives

Technologie en forte évolution. Le marché actuel est encore largement au stade du prototype et de la démonstration. De nombreux verrous technologiques sont à lever.

Marchés de niche pour 2005-2008.

Premières applications dans les transports pour 2010-2020.

Le coût des piles à combustible est situé entre 10 000 et 20 000 E/kW. Pour devenir concurrentielle, cette technologie doit atteindre un coût inférieur à 1500 E/kW en stationnaire et de l'ordre de 50 euros/kW pour les applications véhicules particuliers. Pour les applications portables, le coût n'est pas déterminant.

---

Position actuelle de l'industrie française

Émergente

La filière française de fabrication des piles n'est encore qu'émergente avec la création d'Axane (filiale d'Air Liquide) et d'Héliion (filiale d'Areva). Ces deux sociétés travaillent aujourd'hui sur la technologie PEMFC en assurant une veille sur la filière SOFC. En raison d'une moindre implication de la grande industrie française (chimie, matériaux) dans la fabrication des composants de cœur de pile, elles sont contraintes de conclure des partenariats à l'étranger pour approvisionner et développer les composants dont elles ont besoin.

Pour les utilisations embarquées, les constructeurs automobiles français investissent dans les solutions avec réformeur.

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Les offreurs de services énergétiques: EDF, GDF et Dalkia s'intéressent aux applications stationnaires.

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 démarrera réellement.

Le leader mondial du secteur est le nord américain Ballard.

Industriels potentiellement concernés: AREVA et Air Liquide

---

Acceptabilité sociale

Liée au carburant utilisé (toxicité du méthanol, perception éventuellement négative de l'hydrogène...)

---

### Photovoltaïque

108

#### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Modéré

Si la moitié des toitures existantes étaient utilisées comme générateur solaire, elles produiraient l'équivalent de la consommation électrique finale française. Mais cette source d'énergie intermittente est limitée par la capacité de stockage électrique. Cette source d'énergie pourrait dans le futur répondre à une part importante de la demande mondiale d'énergie (aujourd'hui moins de 1 % de la consommation mondiale d'énergie) en particulier dans les PVD si l'électricité produite pouvait être plus facilement stockée. La contribution à la réduction des émissions est d'autant plus importante que la part d'électricité produite par des centrales thermiques est conséquente.

---

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Contribution à la compétitivité  
des entreprises françaises

Modéré à fort

Depuis le début des années 90 les ventes mondiales de systèmes photovoltaïques augmentent d'environ 30 % par an. Le marché mondial en 2000 est d'environ un milliard de dollars. (source WEC). Mais outre la croissance actuelle du marché, l'avenir des technologies photovoltaïques évoluera avec les possibilités d'applications par les diverses voies d'intégration au bâtiment en particulier (voir développement et perspectives)

---

Contribution à l'indépendance  
énergétique de la France

Moyenne

Réduction des besoins énergétiques des bâtiments, l'une des pièces maîtresse des bâtiments basse énergie.

---

Contribution à l'adéquation  
offre/demande

Forte dans le cadre d'une utilisation décentralisée.

---

Contribution au développement

Fort

Perspective d'une utilisation importante dans les PED, qui sont majoritairement des pays ensoleillés, dans les endroits où il n'y a pas de réseau électrique (le coût de l'énergie photovoltaïque peut d'ores et déjà être plus intéressant que le coût de l'électricité produite avec un groupe électrogène mais l'investissement initial est beaucoup plus important). La puissance photovoltaïque installée en Inde est déjà plus de trois fois celle installée en France.

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Faisabilité

Stade de développement et perspectives

Le rendement des cellules photovoltaïques commercialisées aujourd'hui est de 15 %. En laboratoire des cellules dont le rendement est doublé existent. L'enjeu majeur pour cette technologie est la réduction des coûts qui seraient compétitifs avec les technologies classiques de production électrique au-delà de 2020. Les axes de développement concernent aussi les applications: tuiles solaires, vitrages, revêtements photovoltaïques pour parois verticales, récupération par des cellules du rayonnement de combustion, modules hybrides photovoltaïques et thermiques.

---

Position actuelle de l'industrie française

Un savoir-faire grandissant avec Photowatt, Total Énergie et Apex BP Solar. Mais le leader de l'industrie est le japonais Sharp, BP Solar (GB) et Kyocera (Japon) se partagent la seconde place; le groupe Shell qui a racheté (avril 2002) les activités de Siemens Solar est désormais le quatrième producteur.

Industriels potentiellement concernés: Total Énergie, Photowatt...

---

Acceptabilité sociale

Liée aux besoins énergétique auxquels elle peut répondre: suffisante pour les besoins de d'électrification de base mais encore trop limitée pour les besoins de puissance. Le principal reproche fait aux panneaux photovoltaïques est leur esthétique qui sera a priori améliorée avec les progrès d'intégration au bâtiment.

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Séquestration du dioxyde de carbone

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Forte

Une réussite technologique et économique de la séquestration du CO<sub>2</sub> permettrait de continuer à utiliser des énergies fossiles pour la production d'électricité et les industries fortement consommatrices, en attendant l'arrivée à maturité d'autres « ruptures technologiques ».

Elle permettrait également de commencer à envisager la production d'hydrogène à partir du gaz naturel.

---

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises

Forte

L'enjeu compétitif est fort, essentiellement pour les marchés de l'export.

Au sein de l'OCDE, la production d'électricité est responsable de près de 40 % des émissions de CO<sub>2</sub> d'origine énergétique. Dans de nombreux pays, le remplacement des centrales thermiques ne paraît pas envisageable à horizon de 20 ans.

En Inde et en Chine, cette technologie conditionnera l'utilisation des réserves de charbon.

---

Contribution à l'indépendance énergétique de la France

Forte

La séquestration du CO<sub>2</sub> rendrait possible une utilisation plus intense des ressources fossiles

---

Contribution à l'adéquation offre/demande

---

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Contribution au développement

Forte.

La séquestration du CO2 serait de nature à permettre à la Chine et à l'Inde de faire face à leur demande d'énergie en utilisant leurs réserves de charbon dans le respect de l'environnement.

---

### Faisabilité

Stade de développement et perspectives

En évolution.

La réduction du coût de la chaîne capture/transport/stockage est un objectif majeur. Le coût de la tonne de CO2 évité est aujourd'hui de 60 € environ.

---

Position actuelle de l'industrie française

Potentiellement forte.

Mais manquant de cohérence. Des entreprises comme Total, Air Liquide, Alstom ont engagé des actions de recherche et de démonstration dans des cadres français et européen. L'ampleur des moyens à mettre en œuvre plaide cependant en faveur de davantage de mutualisation.

Les laboratoires publics de nature à soutenir l'industrie dans ces projets sont le BRGM, l'IFP, les Écoles des mines, le CNRS...

Industriels potentiellement concernés: Alstom, GDF, Total

---

Acceptabilité sociale

Problématique

La nécessité de stocker durablement de grandes quantités de dioxyde de carbone conduit à une gestion de déchets qui doit être assurée dans des conditions de sécurité satisfaisante et jugées comme telles par l'opinion publique.

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Stockage de l'électricité

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Fort à très fort

Verrou technologique. En fonction de l'ampleur de la capacité de stockage: stockage de l'électricité nucléaire pour diminuer la production électrique de pointe avec des centrales thermiques, stockage de l'électricité issue d'énergies renouvelables intermittentes, stockage pour les véhicules électriques (à combiner à la possibilité de charge rapide pour cet usage).

---

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises

Fort.

Le marché est mondial. Cependant le marché se développe par du stockage de faible capacité (pour téléphones portables et ordinateurs). Intérêt particulier pour les zones ne disposant pas d'un réseau électrique.

---

Contribution à l'indépendance énergétique de la France

Fort

Si stockage de très forte capacité moindre recours aux combustibles fossiles pour la demande de pointe. Utilisation maximisée des énergies intermittentes et renouvelables.

---

Contribution à l'adéquation offre/demande

Fort

Plus de nécessité de produire l'électricité en même temps qu'elle est consommée.

---

Contribution au développement

Fort

En particulier pour les pays en développement dans les zones ne disposant pas de réseau et valorisation du potentiel du solaire et de l'éolien.

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Faisabilité

Stade de développement et perspectives

Les batteries progressent régulièrement au stade des prototypes et du laboratoire et de nouveaux couples électrochimiques sont prometteurs. Les demi-piles à combustibles ou accumulateurs sous pression sont une seconde voie de recherche. Enfin la production d'hydrogène est une troisième voie de stockage de l'électricité.

Position actuelle de l'industrie française

EDF poursuit des recherches dans le domaine du stockage électrique. Les industriels français qui commercialisent aujourd'hui des batteries et accumulateurs sont Bolloré et Saft. Bolloré est un groupe très diversifié, Saft est le leader des accumulateurs de haute technologie (filiale d'Alcatel qui vient d'être vendue à un groupe britannique).

114

Acceptabilité sociale

Les risques sont liés à la toxicité de l'électrolyte (l'acide pour les batteries au plomb) et au problème de recyclage pour les accumulateurs en fin de vie.

## Production, transport et stockage de l'hydrogène

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Potentiellement forte à long terme en cas de déploiement d'une « économie de l'hydrogène »

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises

Forte

Une fois surmontées les difficultés liées aux améliorations de coûts et de performance pour sa production et son stockage, l'hydrogène pourrait représenter une technologie de rupture de nature à modifier complètement le paysage énergétique.

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Contribution à l'indépendance énergétique de la France	Forte  L'hydrogène, qui n'existe pas à l'état naturel, peut être produit à partir de toutes les énergies primaires: fossiles, nucléaire, renouvelables.
Contribution à l'adéquation offre/demande	Forte
Contribution au développement <sup>2</sup>	Faible  Compte tenu du coût de déploiement d'un réseau de distribution d'hydrogène.

---

### Faisabilité

Stade de développement et perspectives	En évolution  Les difficultés sont aujourd'hui techniques financières.  Il faut d'abord être en mesure de produire l'hydrogène sans émission de GES, ce qui, au moins dans un premier temps, sera étroitement lié à la réussite de la séquestration du CO <sub>2</sub> .  Ensuite il faut progresser dans le domaine de la " logistique hydrogène ", notamment en travaillant sur les solutions qui permettent d'augmenter le contenu énergétique de l'hydrogène (compression ou liquéfaction).  Enfin, l'utilisation de l'hydrogène est largement conditionné par le succès de la pile à combustible dont les coûts restent à diviser par 100 pour les usages automobiles et par 10 pour les usages stationnaires.  A très court terme, les coûts ne devraient pas permettre à l'hydrogène de remplacer les autres carburants, ce qui n'empêcherait pas une première étape de l'économie de l'hydrogène de se mettre en place
--	--

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

	avec des piles à combustible fonctionnant dans des véhicules en étant alimentées par d'autres carburants.
Position actuelle de l'industrie française	Favorable  L'hydrogène est de nature à occuper une place importante dans la stratégie de plusieurs grandes entreprises françaises: constructeurs automobiles, TOTAL, Air Liquide, GDF
Acceptabilité sociale	La perception des dangers supposés liés à l'hydrogène peut être un handicap (cf. « bombe à hydrogène »). Ce sujet est à traiter très en amont d'une potentielle commercialisation pour des usages domestiques ou embarqués.

---

### Réacteurs nucléaires de génération 4

Aujourd'hui les réacteurs nucléaires électrogènes couplés à un réseau d'électricité en service dans le monde sont dits de deuxième génération. Les réacteurs du parc actuel d'EDF sont des réacteurs à eau pressurisée (REP)<sup>39</sup>. Le coût du MWh nucléaire est compétitif par rapport à celui de la plus performante des électricités fossiles, celle que produisent les centrales à gaz à cycles combinés et est peu sensible au prix du combustible.

La troisième génération de réacteurs, à laquelle appartient l'EPR (European Pressurized Water Reactor), est dérivée de la précédente mais présente des avancées significatives avec un référentiel de sûreté intégrant les exigences européennes, une diminution de la quantité des déchets à vie longue, une meilleure utilisation des ressources énergétiques. La génération 4, en revanche, est celle des systèmes du futur et se situe en rupture technologique par rapport à la génération précédente. La sélection des concepts les plus prometteurs pour ces systèmes a été finalisée en 2002 dans le cadre international du « forum international génération 4 » dont sont membres l'Argentine, le Brésil, le Canada, la France, le Japon, la République de Corée, l'Afrique du Sud, la Suisse, le Royaume Uni et les États Unis). Six systèmes nucléaires ont été retenus. Ils supposent tous des avancées technologiques très importantes.

#### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre	Forte
--	-------

---

<sup>39</sup> Pressurized Water Reactor (PWR) en anglais.

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

	Une réaction nucléaire n'émet pas de gaz à effet de serre
Contribution à la compétitivité des entreprises françaises	<p>Forte.</p> <p>Les marchés potentiels du nucléaire ne se limitent pas à la France et à l'Europe mais concernent également le Japon, la Corée du Sud, les États-Unis, la Chine, l'Inde, le Brésil, l'Argentine, ainsi que les pays d'Europe centrale et orientale. Les marchés des deux ou trois prochaines décennies ne sont concernés que par la troisième génération de réacteurs, mais pourront l'être par la quatrième après 2035.</p> <p>Plus de 50 % du chiffre d'affaires du pôle nucléaire d'AREVA est réalisé hors du territoire national.</p>
Contribution à l'indépendance énergétique de la France	<p>Forte</p> <p>Le taux d'indépendance énergétique de la France est passé de 20 à 50 % au cours des 30 dernières années grâce au programme national électronucléaire. Aujourd'hui l'indépendance de la France est garantie par un stock d'Uranium qui permet aux centrales électriques de fonctionner pendant plusieurs années en complète autonomie.</p>
Contribution à l'adéquation offre/demande	<p>Forte</p> <p>Si une forte proportion de la production d'électricité continue d'être assurée en France par des réacteurs de génération 4.</p>
Contribution au développement	<p>Moyenne</p> <p>Le nucléaire ne pouvant concerner que des pays stables politiquement</p>

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Faisabilité

Stade de développement et perspectives

Les recherches sur les six systèmes sélectionnés commencent tout juste, de nombreux verrous technologiques sont à lever.

Il n'est pas envisageable que la quatrième génération atteigne une maturité technique et économique avant les années 2030, rendant possible une industrialisation à partir de 2035-2040.

---

Position actuelle de l'industrie française

Forte

Aréva est le n° 1 mondial du cycle du nucléaire, via Cogéma pour le cycle du combustible qui va de la mine d'uranium au traitement des combustibles usés, et Framatome pour la conception et la construction des réacteurs nucléaires.

EDF est l'un des plus importants distributeurs d'électricité dans le monde.

En appui à cette puissance industrielle, la France possède avec ses organismes de recherche (CEA, ANDRA, ISRN, CNRS) une compétence scientifique et technologique internationalement reconnue.

---

Acceptabilité sociale

Problématique

Liée à l'existence des déchets radioactifs, à la perception de la sûreté des réacteurs et des risques de prolifération.

En France, la loi du 30 décembre 1991, dite loi Bataille, a instauré un moratoire de 15 ans pour mener les recherches permettant d'éclairer les choix envisageables pour la gestion des déchets radioactifs.

La génération 4 de réacteur devrait continuer à produire des déchets radioactifs, mais en moins grande quantité.

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Déchets nucléaires

La loi du 30 décembre 1991, reprise dans l'article L 542 du code de l'environnement, prévoit un moratoire de 15 ans sur le stockage des déchets radioactifs. Pendant cette période et sur la base de la loi, des recherches visant à établir les modes de gestion les plus appropriés des déchets à haute activité et à vie longue sont poursuivis sur trois axes :

- séparation et transmutation d'éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets ;
- stockage réversible ou irréversible dans des formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains ;
- conditionnement et entreposage de longue durée en surface.

La coordination de l'axe 2 est confiée à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA). Le CEA est chargé du pilotage des axes 1 et 3.

La loi prévoit que ces recherches fournissent au législateur et aux pouvoirs publics, au plus tard en 2006, les éléments d'appréciation nécessaires à un examen de la question et, le cas échéant, à la promulgation d'une loi créant un centre de stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde.

## Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre	Forte	
		Car une solution satisfaisante pour les déchets est de nature à améliorer l'acceptabilité sociale de l'énergie nucléaire (1)
<hr/>		
Contribution à la compétitivité des entreprises françaises		
<hr/>		
Contribution à l'indépendance énergétique de la France	Forte	
Idem (1)		
<hr/>		
Contribution à l'adéquation offre/demande	Forte Idem (1)	
<hr/>		
Contribution au développement	Moyenne	
<hr/>		

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Faisabilité

Stade de développement et perspectives

---

Position actuelle de l'industrie française

---

Acceptabilité sociale

---

## Réacteurs à fusion

La fusion nucléaire est l'union de plusieurs atomes légers en un atome plus lourd. Réalisée à très haute température (plusieurs millions de degrés), elle entraîne un grand dégagement d'énergie. La fusion des noyaux d'hydrogène est la source d'énergie qui alimente le soleil. Sur Terre, la fusion du deutérium et du tritium, éléments appartenant à la famille de l'hydrogène, au sein d'un réacteur de type Tokamak, peut être réalisée à une température de l'ordre de 200 millions de degrés, suffisante pour que la réaction de fusion s'entretienne, tout en étant contrôlée. La fusion, qui est étudiée depuis un demi siècle, constituerait une réserve d'énergie abondante et sûre, dont le développement permettrait à terme de disposer d'une nouvelle option énergétique, dans la perspective d'un développement durable à l'échelle mondiale.

La fusion est traitée au plan européen par Euratom, l'association Euratom-CEA étant la plus ancienne qui existe entre l'Europe et un organisme de recherche et, au plan international, dans le cadre du projet ITER, auquel participent l'Europe, les États-Unis, le Japon, la Chine, le Canada, la Corée du Sud et la Russie. Ce projet doit permettre la construction d'une installation expérimentale. La répartition du financement d'ITER dépendra du nombre final de participants au projet et du site retenu pour l'accueillir.

## Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre	Forte.
--	--------

---

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises	Forte.
--	--------

---

Contribution à l'indépendance énergétique de la France	Totale
--	--------

Le deutérium est un élément qui peut être extrait de l'eau de mer et ses réserves sont estimées à plusieurs milliards d'années de consommation mondiale; le tritium, élément radioactif à vie courte, sera fabriqué dans le réacteur de fusion, à partir de lithium, élément très

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

abondant dans la croûte terrestre et les océans.

---

Contribution à l'adéquation offre/demande

Forte

---

Contribution au développement

Forte

---

### Faisabilité

Stade de développement et perspectives

De 2005 à 2035, ITER, réacteur expérimental doit permettre de démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'énergie de fusion.

Démonstrateur technologique vers 2030.

Prototype de démonstration de la faisabilité industrielle vers 2060.

---

Position actuelle de l'industrie française

Les industriels sont pour le moment absents du projet, compte tenu de son échéance prévisible. Cependant, si à ce terme, AREVA est toujours leader mondial dans le domaine de la fission et si la fusion est devenue un succès technologique, cette entreprise devrait bénéficier de tous les atouts pour relever les défis liés à la fusion.

---

Acceptabilité sociale

Potentiellement meilleure que pour le nucléaire de fission.

Le nucléaire de fusion ne produit pas de déchets de haute activité à vie longue. Après quelques dizaines d'années, le contenu radiotoxique des déchets aura décru jusqu'à une valeur très faible. Ces matériaux ne devraient donc pas constituer une charge pour les générations futures.

La sûreté du fonctionnement du réacteur est garantie, car son principe même exclut tout emballement de la réaction de fusion.

---

# Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

## Géothermie profonde et géothermie généralisée

L'exploitation de la chaleur contenue dans la croûte terrestre, et du flux qui s'en dégage constitue une des voies à développer en matière de production d'énergie renouvelable. Les recherches entreprises à Soultz-sous-Forêts montrent qu'il est possible de maîtriser les techniques de fracturation hydraulique permettant la création d'échangeurs géothermiques dans les milieux granitiques profonds. Reste à apprécier l'économie de la production d'électricité qui en résultera par conversion thermo-électrique de l'énergie véhiculée par la boucle géothermale artificiellement entretenue. Par application à d'autres milieux géologiques cette technologie permettra aussi de traiter les aquifères insuffisamment perméables ainsi que les champs géothermiques conventionnels peu producteurs.

### Objectifs stratégiques

Contribution à la diminution des émissions de gaz à effet de serre

Forte

La géothermie est la seule source d'énergie renouvelable basée sur les flux qui permette des fonctionnements en base (8 000 heures/an). La maîtrise des boucles géothermales fermées évite le contact du fluide caloporteur avec l'atmosphère et il ne se produit donc aucune émission de GES. La contribution à la réduction des émissions des GES sera proportionnelle à la part que prendra ce système de production d'énergie électrique dans le bouquet énergétique de demain.

Contribution à la compétitivité des entreprises françaises

Moyenne à forte

Les entreprises françaises de forage et de systèmes de conversion thermo-électrique (conversion à cycle direct et à cycle binaire) devront faire un effort pour s'adapter aux spécificités des milieux géologiques profonds. On dispose pour l'exploration géologique et l'ingénierie géothermique d'une solide base de référence acquise depuis 30 ans par le BRGM.

Contribution à l'indépendance énergétique de la France

Moyenne à forte

En métropole, la contribution sera proportionnelle à la part que pren-

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

dra la géothermie dans le bouquet énergétique. Quelques pourcents sont très vraisemblables.

Dans les DOM la généralisation de la géothermie (conventionnelle et artificiellement stimulée) devrait permettre de satisfaire leurs besoins énergétiques par géothermie, voire de les transformer en sites attractifs pour l'industrie fortement consommatrice soucieuse de production propre.

---

Contribution à l'adéquation offre/demande

Forte dans les DOM, moyenne à forte en métropole, dans le cas de généralisation des dispositifs de production décentralisée de capacité unitaire de l'ordre de 100 ou de 200 MWe. Perspectives très importante dans certains pays à l'export; une opportunité à ne pas manquer

---

Contribution au développement

Très forte

Ce domaine est largement ouvert. La mise en œuvre des outils de la géothermie généralisée ouvrira des perspectives nouvelles dans un certain nombre de pays, dont certains qui couvrent déjà une partie de leurs besoins en énergie électrique par géothermie (Phillipines, Salvador, Keynia,...) et d'autres qui possèdent des potentiels inexploités (Turquie, Grèce, pays d'Europe centrale, Indonésie, Ethiopie...).

---

### Faisabilité

Stade de développement et perspectives

Le pilote scientifique de Soultz (5 - 6 MWe) verra le jour en 2006. Un prototype industriel (25 MWe) devrait pouvoir être opérationnel avant 2015 pour un déploiement vers 2020. Les coûts de production du kWh devraient à ce moment être compétitif par rapport aux énergies conventionnelles et aux EnR arrivées à maturité.

---

## Annexe X: conclusions de l'analyse multicritères des pistes de recherche sélectionnées

---

Position actuelle de l'industrie française

Pas plus que dans le reste du monde (exceptions faites des USA, des Philippines et de l'Italie) il n'y a pas vraiment de grands intégrateurs industriels en France. Seul Alstom s'est ouvertement lancé dans la fabrication de turbines adaptées à la géothermie et a ainsi équipé le Mexique pour plus de 100 MWe. Le savoir-faire de l'expérience de Soultz (stimulation hydraulique et création d'échangeurs artificiels profonds en milieu granitique) sera versé notamment au patrimoine du groupe EDF qui investit dans le GEIE de Soultz.

---

Acceptabilité sociale

Non problématique

---