



LES TECHNIQUES DE L'ÉNERGIE ET LA RÉGION LYONNAISE

Tome 1 : Rétrospective

Tome 2 : Tendances actuelles

Tome 3 : Prospective

Février 2007

Etude réalisée par Boris Chabanel

Résumé

L'énergie tient depuis toujours une place essentielle dans le fonctionnement des sociétés. De la préhistoire, et la découverte fondatrice du feu, jusqu'à aujourd'hui, l'homme a su exploiter d'autres sources d'énergie que sa seule force musculaire. Aujourd'hui, cette quête d'une énergie toujours plus puissante et abondante rencontre deux enjeux sociétaux inédits : le décalage croissant entre l'évolution de la demande et celle de l'offre mondiales d'énergie ; la « contribution » déterminante de la production et de la consommation d'énergie au phénomène de « changement climatique ».

Trois grands leviers technologiques se profilent pour proposer des réponses à ces enjeux : la maîtrise de la croissance de la demande par la recherche systématique des économies d'énergie (développer des véhicules plus économes en carburants, développer l'efficacité énergétique des bâtiments et de leur équipement...) ; le développement des filières énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone (développer les alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion, développer la production de chaleur issue des énergies renouvelables...) ; la séquestration des émissions de CO₂ à la source (développer les dispositifs techniques de capture et de stockage, accroître la couverture végétale).

La métropole lyonnaise a les moyens de relever ces défis technologiques dans la mesure où elle peut compter sur la présence d'acteurs majeurs sur la scène énergétique mondiale, avec notamment l'Institut Français du Pétrole et le pôle de compétitivité « Axelera ».

Sommaire

INTRODUCTION	5
LE CONCEPT D'ÉNERGIE	7
LES DEFIS TECHNOLOGIQUES DE L'AVENIR ÉNERGETIQUE	15
LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES EN RÉGION LYONNAISE..	75
ANNEXE : PROPOSITION DE HÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE	91
SOURCES.....	93

Table des matières

INTRODUCTION	5
LE CONCEPT D'ÉNERGIE	7
Différentes formes d'énergie	7
1. L'énergie libre	7
2. L'énergie stockée	7
Les propriétés de l'énergie	8
1. L'énergie se conserve mais tend à se dissiper.....	8
2. L'énergie libre peut se transformer.....	9
3. L'énergie se mesure	10
Le système énergétique	11
1. L'énergie primaire	11
2. L'énergie secondaire	11
3. L'énergie finale	12
4. L'énergie utile	12
Panorama (non exhaustif) du système technique de l'énergie aujourd'hui	13
LES DEFIS TECHNOLOGIQUES DE L'AVENIR ÉNERGETIQUE.....	15
Une gageure : alimenter le développement mondial tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre	15
Une équation délicate face à laquelle les pays anciennement industrialisés ont une responsabilité particulière	15
La nécessité de mobiliser simultanément différents leviers technologiques	17
Premier levier technologique : systématiser les économies d'énergies	18
Le secteur des transports : développer des véhicules plus économes en carburants	20
Le secteur des transports : développer les modes de transports de passagers et de marchandises alternatifs à la route	27
Le secteur résidentiel et des services : développer l'efficacité énergétique des bâtiments et de leur équipement.....	36
Le secteur de l'industrie : développer le recyclage	41
Le secteur de la production d'électricité : améliorer le rendement des processus de transformation des énergies primaires en énergies finales	42
Deuxième levier technologique : développer les filières énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone	43
Le secteur des transports : développer les alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion	44
Le secteur des transports : développer les réseaux de transports électriques	50
Le secteur résidentiel et des services : développer la production de chaleur issue des énergies renouvelables	50
Le secteur de la production d'électricité : renouveler la filière nucléaire pour maintenir sa contribution au « mix énergétique » français	53
Le secteur de la production d'électricité : développer les filières fonctionnant grâce aux énergies renouvelables	61
Le secteur de la production d'électricité : réduire l'utilisation des centrales fonctionnant à l'aide de combustibles fossiles par l'amélioration des technologies de stockage de l'électricité.....	67
Troisième levier technologique : séquestrer les émissions de CO2 à la source	69
Les dispositifs techniques de capture et de stockage du dioxyde de carbone sur les sites d'émissions concentrées	70
Renforcer les puits à carbone naturels que sont les végétaux	72
LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES EN RÉGION LYONNAISE..	75
Les acteurs lyonnais des technologies d'économie d'énergie	75
Les technologies d'économie d'énergie dans le secteurs des transports	75
Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment	78
Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur de l'industrie.....	81
Les acteurs lyonnais des technologies énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone	81
Les technologies énergétiques alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion	81
Les technologies de production de chaleur à partir des énergies renouvelables	82
Les technologies de l'énergie nucléaire.....	83
Les technologies de production d'électricité à partir des énergies renouvelables	84

Les acteurs lyonnais des technologies de séquestration du dioxyde de carbone.....	86
Les technologies du captage du dioxyde de carbone	86
Les technologies du stockage géologique du dioxyde de carbone	88
 ANNEXE : PROPOSITION DE HÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE	 91
 SOURCES.....	 93

INTRODUCTION

Depuis l'aube de l'humanité, l'énergie constitue une ressource fondamentale des activités humaines, celle permettant de mettre en valeur les ressources de l'environnement naturel. Progressivement, l'homme a su puiser dans ce même environnement des sources d'énergie prolongeant sa seule force musculaire : l'énergie éolienne, l'énergie solaire...

Aujourd'hui, cette quête d'une énergie toujours plus puissante et abondante rencontre des limites de taille, aux deux bouts de la chaîne énergétique : les ressources énergétiques dominantes que sont aujourd'hui les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) apparaissent pour certaines fortement menacées d'épuisement ; la croissance continue de la consommation de ces énergies fossiles se traduit par un réchauffement de l'atmosphère qui menace dangereusement les grands équilibres gouvernant les processus climatiques.

Parce que la métropole lyonnaise ambitionne d'être un acteur incontournable des technologies énergétiques du 21^{ème} siècle, notamment dans le cadre du pôle de compétitivité « Axelera », le centre de ressource Millénaire 3 de la direction prospective et stratégie du Grand Lyon a souhaité disposer d'un éclairage prospectif des voies technologiques qui se profilent aujourd'hui pour répondre à aux enjeux évoqués. C'est objet de ce document qui fait le lien avec les acteurs lyonnais actuels de la recherche en matière de technologie énergétique

A l'avenir, aucune filière énergétique ne peut prétendre répondre à elle seule à ce double objectif de réponse à la demande et de réduction des émissions de CO₂, de la même manière qu'aucune ne peut être définitivement écartée. Ainsi, trois principales stratégies technologiques semblent devoir être mises en place dès aujourd'hui. La première vise à maîtriser la croissance de la demande d'énergie elle-même, par la recherche systématique des économies d'énergies, et d'abord de combustibles fossiles. La seconde vise à modifier le mix énergétique en promouvant les énergies les moins émettrices de CO₂, notamment pour répondre à la croissance (même limitée) de la demande supplémentaire à venir. La troisième part du principe que le recours aux énergies fossiles sera encore très important durant les prochaines décennies et que, en conséquence, il est essentiel de mettre au point des procédés permettant d'éviter que le CO₂ qui continuera à être émis s'échappe dans l'atmosphère ; elle promeut pour cela la voie du stockage souterrain du CO₂.

Le développement qui suit articule trois approches : la première rappelle les grands principes du concept d'énergie ; la seconde pointe les défis technologiques qu'il s'agit de relever au 21^{ème} siècle pour faire face aux nouveaux enjeux de l'énergie ; la dernière met en évidence les principaux acteurs de la région lyonnaise engagés dans des travaux de recherche s'inscrivant dans les perspectives décrites dans la partie précédente.

LE CONCEPT D'ÉNERGIE

Différentes formes d'énergie

L'énergie se manifeste sous de multiples formes classées en deux grandes catégories : l'énergie stockée, liée à la tension ; l'énergie libre, associée au mouvement.

1. L'énergie libre

L'énergie libre peut se présenter sous quatre formes différentes.

⇒ *L'énergie cinétique*

C'est l'énergie associée au mouvement d'un objet. Elle est proportionnelle à la masse « m » et au carré de la vitesse « v » de l'objet. Par exemple, la pomme sur l'arbre se transforme en énergie cinétique lorsqu'elle tombe.

⇒ *L'énergie thermique*

C'est l'énergie associée à la chaleur. À l'échelle atomique, la chaleur se traduit par un mouvement désordonné et plus ou moins rapide des molécules. A notre échelle, elle constitue la forme d'énergie mise en jeu lorsque la température varie ou lorsqu'un matériau change d'état (fusion de la glace, évaporation de l'eau).

⇒ *L'énergie électrique*

Cette énergie correspond au déplacement, dans la matière, de particules chargées électriquement (les électrons). Un atome est constitué d'un noyau autour duquel gravite un cortège d'électrons. Si certains de ces électrons peuvent s'échapper de leur atome d'origine et évoluer librement dans la

matière, il s'agit d'une matière conductrice. Ces électrons libres pourront être canalisés pour créer un courant électrique.

⇒ *L'énergie rayonnante*

Il s'agit du déplacement de particules de masse nulle (les photons), qui sont associées à une onde électromagnétique, visible (lumière) ou invisible (infrarouge, ultraviolet, rayons X...). Le rayonnement contiendra d'autant plus d'énergie que la fréquence de l'onde associée sera élevée. Ainsi le rayonnement ultraviolet est plus énergétique que le rayonnement visible ou infrarouge. Le soleil est une source d'énergie rayonnante, celle-ci nous étant transmise sous forme de lumière visible et de rayons infrarouge.

2. L'énergie stockée

Contrairement à l'énergie libre, l'énergie stockée peut, par définition, se conserver sur de longues durées en gardant ses qualités intrinsèques.

⇒ *L'énergie potentielle*

Il s'agit d'une énergie mécanique stockée dont la forme libre associée est l'énergie cinétique. Par exemple, la pomme sur l'arbre emmagasine une énergie potentielle due à sa hauteur et à son poids, qui se transforme en énergie cinétique lorsqu'elle tombe de l'arbre. De même, l'eau retenue derrière un barrage constitue un stock d'énergie potentielle ; on peut d'ailleurs l'accumuler si l'on fait remonter l'eau de la rivière de l'aval vers l'amont du barrage.

⇒ *L'énergie chimique*

Alors que l'énergie potentielle utilise une force liée à la matière (il s'agit souvent du poids, comme dans l'exemple de la pomme), l'énergie chimique met en jeu des forces qui lient les atomes entre eux dans les molécules (physique de l'atome). La réaction chimique consiste donc à modifier les molécules en agissant sur les forces de liaison entre atomes. Cette réaction chimique s'accompagne d'une transformation de l'énergie chimique des corps en une autre forme d'énergie, le plus souvent en chaleur. Les mines de charbon ou les réservoirs d'hydrocarbures (pétrole ou gaz) constituent ainsi des stocks d'énergie chimique.

⇒ *L'énergie nucléaire*

L'énergie nucléaire est localisée dans les noyaux des atomes. Ces noyaux, 100 000 fois plus petits que les atomes eux-mêmes, sont constitués de particules plus élémentaires – les protons et les neutrons – très fortement liés entre eux. De même que la liaison des atomes en molécules est la source de l'énergie chimique, la liaison des protons et neutrons en noyaux par des forces nucléaires est la source de l'énergie nucléaire. Une réaction nucléaire, en transformant les édifices des noyaux atomiques, s'accompagne d'un dégagement de chaleur. C'est ce mécanisme qui génère au cœur du Soleil la chaleur qui sera ensuite rayonnée. Il faut cependant distinguer la réaction nucléaire solaire de celle produite au sein des centrales nucléaires. La première est la fusion (assemblage) des noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium. La seconde est la fission (cassure) des noyaux d'uranium, qui les transforme chacun en deux autres noyaux environ deux fois plus petits.

Les propriétés de l'énergie

1. L'énergie se conserve mais tend à se dissiper

La caractéristique la plus remarquable de l'énergie est qu'elle se conserve toujours (1^{er} principe de la thermodynamique). Lorsqu'elle est transférée d'un système à un autre, ou lorsqu'elle change de nature, il n'y a jamais ni création ni destruction d'énergie ; la quantité d'énergie présente dans l'univers est ainsi restée la même depuis l'origine. Si un objet a perdu de l'énergie, la même quantité d'énergie a obligatoirement été gagnée par un autre objet en communication avec le premier. De même, lorsque l'énergie change de forme, le bilan est toujours exactement équilibré. C'est donc par abus de langage que les journaux, les économistes ou les hommes politiques parlent de « production d'énergie », ou de « pertes d'énergie », puisque l'énergie ne peut être ni créée ni perdue.

Dans ce cadre, le système énergétique (cf. infra) mis en place par les civilisations humaines « produit de l'énergie » dans le sens où il rend utilisable pour les besoins finaux les sources d'énergie brutes présentes dans la nature. Or, cette démarche correspond à des transformations successives qui ne permettent pas de convertir l'ensemble de la forme d'énergie primaire dans la forme d'énergie finale recherchée. Par exemple, dans le cycle d'une centrale électrique nucléaire – utilisation de la chaleur dégagée par la fission nucléaire pour chauffer de l'eau dont la vapeur va entraîner un générateur électrique – la consommation de 100 unités d'énergie nucléaire permet finalement d'envoyer sur le réseau seulement 33 unités d'énergie électrique. 67 unités restantes sont des

unités de chaleur qui, si elles ne sont pas récupérées en partie pour chauffer des habitations ou des serres, sont perdues puisque évacuée dans l'environnement par la vapeur d'eau sortant des tours de refroidissement. Ce constat illustre le fait que toute énergie qui prend une forme calorifique ne peut être reconvertie que partiellement : il s'agit du 2^{ème} principe de la thermodynamique. La chaleur représente en effet une forme dégradée de l'énergie : elle correspond à des mouvements désordonnés des molécules alors que les autres formes d'énergie sont ordonnées à l'échelle microscopique. Autrement dit, chaque fois que nous utilisons l'énergie sous forme thermique, nous contribuons à l'évaporation des ressources énergétiques dans l'univers. Ce phénomène appelé « entropie » est ainsi souvent interprété comme une « perte d'énergie ».

2. L'énergie libre peut se transformer

Si l'énergie ne peut être ni créée, ni consommée, ni détruite, lorsqu'elle se présente sous forme libre, elle peut cependant être convertie ou transférée à d'autres formes d'énergie.

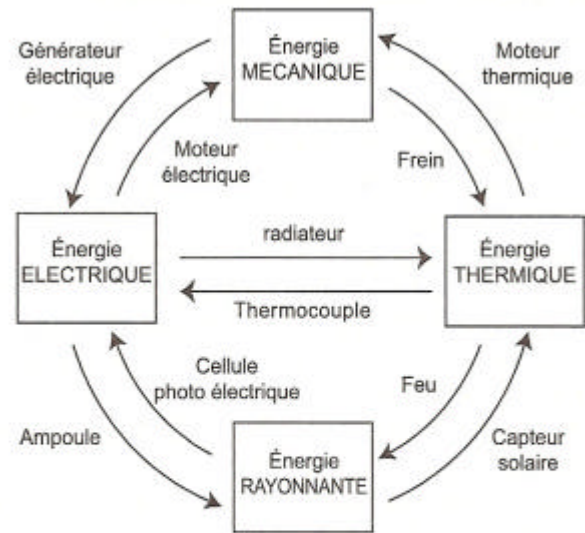
⇒ *La conversion de l'énergie libre en une autre énergie libre*

Les quatre formes d'énergie libre peuvent s'interconvertir grâce à des dispositifs appropriés, appelés convertisseurs d'énergie. Il n'existe cependant pas de procédé industriel convertissant directement le rayonnement en énergie mécanique.

Par ailleurs, toutes les énergies n'ont pas le même niveau de qualité. Certaines sont en effet plus facilement convertibles en d'autres formes et sont ainsi considérées comme plus nobles. Par exemple, le passage de l'énergie mécanique à l'énergie thermique peut se faire spontanément (sans apport

d'énergie) alors que dans le sens inverse il faut disposer d'un moteur thermique qui apportera une énergie extérieure au système.

Transformations des énergies libres et exemples de convertisseurs d'énergie



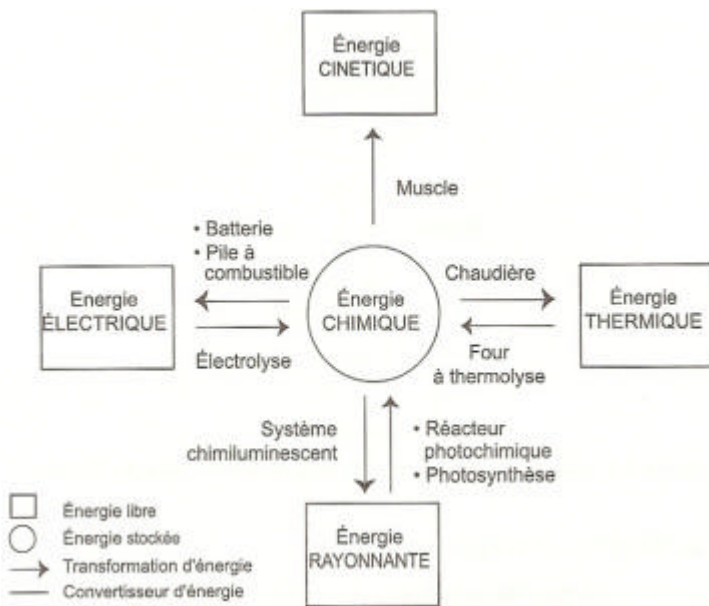
Source : Wiesenfeld B., 2005



⇒ *Le stockage de l'énergie libre en énergie chimique*

Il est également possible de stocker trois des quatre formes d'énergie libre en énergie chimique. La quatrième énergie libre, l'énergie cinétique, ne peut être convertie en énergie chimique, mais l'inverse est possible (par exemple, au moyen d'un muscle chez l'animal).

Transformations entre énergie chimique et énergies libres et exemples de convertisseurs d'énergie



Source : Wiesenfeld B., 2005

3. L'énergie se mesure

⇒ *Une unité de mesure commune à toutes les formes d'énergie : le joule*

C'est la propriété de conservation de l'énergie qui nous permet de mesurer, à l'aide d'une seule et même unité, les diverses formes de l'énergie. Toutes les formes d'énergie, cinétique, thermique... sont la manifestation d'une même grandeur physique qui traduit la capacité d'un système à produire du mouvement. Ainsi, l'énergie, dite cinétique, associée au mouvement d'un objet de masse « m » et de vitesse « v » vaut $E = 1/2 mv^2$; lorsque la masse est exprimée en kilogrammes et la

vitesse en mètres par seconde, cette formule donne l'énergie en joules (J), unité légale dans le système international.

À l'époque où l'on n'avait pas encore reconnu que la chaleur était une forme de l'énergie, l'étude des échanges thermiques avait conduit à introduire une unité de chaleur, la calorie, définie comme la quantité de chaleur à fournir à 1 gramme d'eau pour élever sa température de 1 degré Celsius. L'expérience a montré que les transformations d'énergie mécanique en chaleur, ainsi que les transformations inverses, se faisaient toujours avec le même rapport, à savoir 1 calorie pour 4,18 joules. Il y a donc équivalence entre ces deux formes d'énergie (mécanique et chaleur). Ceci a permis d'abandonner la calorie et de mesurer la chaleur et toutes les autres formes d'énergie, en joules.

Face à la croissance des volumes d'énergies consommées, et avec la place prédominante qu'occupe depuis plusieurs décennies le pétrole, la Tonne-équivalent-pétrole (Tep) est devenue l'« unité » de mesure des énergies primaires du point de vue économique et social. Elle correspond au pouvoir calorifique issu de la combustion d'une tonne de pétrole qui, par définition, vaut 41,868 giga joules (1 giga équivaut à 1 milliard), soit 10 giga calories. Elle sert aux économistes de l'énergie pour comparer entre elles des formes d'énergie différentes. Les équivalences sont calculées en fonction du contenu énergétique ; ce sont des moyennes choisies par convention : 1 tep = 11 628 kWh ; 1 tep = 1 000 m³ de gaz ; 1 tep = 7,33 barils de pétrole.

⇒ *La mesure de l'énergie dans le temps : la puissance*

Les échanges d'énergie sont caractérisés, non seulement par la quantité d'énergie transférée ou

transformée, mais aussi par la durée du processus. La notion de puissance est ainsi définie comme une quantité d'énergie échangée par unité de temps. L'unité de puissance, le watt, est donc le joule par seconde. Un radiateur électrique de 1 500 W consomme durant chaque seconde une énergie électrique de 1 500 J, et par suite, durant chaque heure (3 600 secondes), une énergie électrique de $3\,600 \times 1\,500 \text{ J} = 5\,400\,000 \text{ J}$, transformée en énergie calorifique. Cet exemple montre que le joule est une unité d'énergie trop petite pour nos usages courants. On emploie souvent en pratique le kilowattheure (kWh), quantité d'énergie mise en jeu par un appareil d'une puissance de 1 000 W pendant un délai d'une heure.

Le système énergétique

En première analyse (J.C. Debeir, J.P. Deleage Jean-Paul, D.Hemery, 1986), l'action de l'homme pour accéder à l'énergie consiste essentiellement à mettre au point des convertisseurs permettant de transformer des ressources naturelles brutes (les énergies primaires) en vue d'une utilisation précise (énergie utile). Ce processus de conversion peut présenter des étapes intermédiaires de transformation, l'énergie devant souvent faire l'objet d'un traitement pour qu'elle soit véritablement utilisable (énergie secondaire) et d'un transport vers les lieux de consommation (énergie finale). Dans une acception réduite, le concept de système énergétique désigne les caractéristiques écologiques et technologiques des filières énergétiques, c'est à dire l'évolution des sources primaires, des convertisseurs et de leur rendement) ; c'est cette approche qui est précisée

ici. Dans une acception élargie, on ajoute à ces considérations écologiques et technologiques les questions de structures sociales d'appropriation et de gestion de ces ressources et convertisseurs.

1. L'énergie primaire

L'énergie primaire correspond à la somme des sources d'énergie disponibles à l'état brut dans la nature. On distingue les énergies primaires non renouvelables et les énergies primaires renouvelables. Les premières rassemblent les combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) et les combustibles nucléaires (uranium, thorium). Les secondes sont l'hydraulique (fil de l'eau, marées), l'éolien (vent), le solaire (chaleur et rayonnement), la biomasse (bois, végétaux, déchets fermentescibles d'origine animale, ménagère et industrielle) et la géothermie (chaleur du sol terrestre). Les énergies primaires non renouvelables se présentent sous la forme d'une énergie stockée. Les énergies primaires renouvelables peuvent être de forme libre (éolien, solaire) ou stockée (hydraulique, biomasse, géothermie).

2. L'énergie secondaire

L'utilisation directe des énergies primaires est de plus en plus rare. En effet, dans la plupart des cas, ces énergies brutes doivent être transformées en sources d'énergie secondaires pour être mises en œuvre, c'est-à-dire stockées, transportées et utilisées. Les énergies secondaires sont le résultat de ces transformations :

- les produits pétroliers issus du raffinage du pétrole brut (essence, kérosène, gasoil, fuel domestique) ;

- l'électricité produite dans les centrales thermiques (combustibles fossiles) ou nucléaire (combustible fissile) et dans les installations utilisant une énergie renouvelable ;
- la vapeur, provenant généralement de la conversion d'énergies renouvelables (biomasse, solaire, géothermie) ;
- l'hydrogène, produit à partir de combustibles fossiles, de biomasse ou d'une source d'énergie thermique et de l'eau, pourrait devenir un vecteur énergétique de premier plan à partir de 2050, notamment pour la propulsion des moyens des transports.

3. L'énergie finale

L'énergie primaire, une fois convertie en énergie secondaire doit être acheminée jusqu'à l'utilisateur final. Cette opération s'effectue en deux étapes : il s'agit d'abord de transporter massivement l'énergie des centres de production vers les régions consommatrices, puis de redistribuer localement l'énergie vers les utilisateurs. L'énergie finale désigne ainsi l'énergie consommée (achetée) concrètement par les activités humaines ; l'énergie finale est la dernière connue statistiquement dans le processus de conversion énergétique.

Les activités humaines utilisatrices d'énergie sont classés en trois grands secteurs : le domestique (logement et locaux de travail), les transports, l'industrie. Ces différents secteurs peuvent se répartir en fonction des énergies libres suivantes :

- énergie thermique : chauffage, réfrigération (locaux d'habitation et de travail, industries de production de matériaux) ;
- énergie cinétique : transports, industrie (moteurs, pompes...), domestique (appareils ménagers, ascenseurs...) ;

- énergie rayonnante : éclairage, télécommunications, télévision... ;
- énergie électrique : elle est un cas particulier puisque à la fois énergie libre et vecteur énergétique ; on la retrouve dans tous les secteurs d'utilisation de l'énergie.

4. L'énergie utile

Les chaînes énergétiques ne s'achèvent pas avec la consommation d'énergie finale. Il convient d'ajouter un dernier niveau après l'énergie finale : l'énergie utile qui correspond à la sortie (output) des dispositifs (chaudière, moteurs, ampoules...) assurant la transformation de l'énergie finale en formes d'énergie répondant à la satisfaction d'un besoin. Pourraient ainsi être mesurés la chaleur cédée par le combustible au circuit d'eau chaude, le travail mécanique fourni réellement par l'arbre du moteur ou la lumière émise par une ampoule électrique.

Panorama (non exhaustif) du système technique de l'énergie aujourd'hui

Energies à l'état naturel	Energie primaire (extraction)	Energie secondaire (1 ^{ère} transformation)		Energie finale (distribution)
Biomasse (bois, déchets d'élevage, ménagers...)	Découpes du bois	Calibrage		Stères de bois
	Stockage des déchets	Production de biogaz par fermentation anaérobie	Utilisation de la combustion de la biomasse pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau	Electricité
Force des animaux	Sélections des espèces les plus dociles (cheval, bœufs...)	Harnachement		Mouvement
Force du vent	Moulins à vent	Mise à disposition du mouvement de rotation de l'axe du moulin pour l'entraînement de différents mécanismes		Mouvement
	Eoliennes	Utilisation du mouvement de rotation de l'axe de l'éolienne pour l'entraînement d'un générateur électrique		Electricité
Force de l'eau	Moulins à eau	Mise à disposition du mouvement de rotation de l'axe du moulin pour l'entraînement de différents mécanismes		Mouvement
	Barrages	Utilisation de la force cinétique de l'eau pour l'entraînement d'un générateur électrique		Electricité
Rayonnement du soleil	Capteurs	Utilisation de la chaleur du rayonnement solaire pour réchauffer un fluide caloporteur		Chaleur
		Utilisation des propriétés électromagnétiques du rayonnement solaire via des cellules photovoltaïques		Electricité
Chaleur du sol	Pompes à chaleur	Utilisation de la géothermie basse température pour réchauffer un fluide caloporteur		Chaleur
		Utilisation de la géothermie haute température pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau		Electricité
Charbon	Mines	Lavage, calibrage...		Charbon
		Lavage, calibrage	Utilisation de la combustion du charbon pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau	Electricité
Pétrole	Forages	Raffinage...		Essence, gasoil, fuel, kérosène
		Raffinage...	Utilisation de la combustion du fuel pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau	Electricité
Gaz	Forages	Conditionnement		Gaz
		Conditionnement	Utilisation de la combustion du gaz pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau	Electricité
Minerai d'uranium	Mines	Utilisation de la réaction nucléaire pour l'entraînement de générateurs électrique via la production de vapeur d'eau		Electricité

Une gageure : alimenter le développement mondial tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre

Une équation délicate face à laquelle les pays anciennement industrialisés ont une responsabilité particulière

⇒ *Quantifier les objectifs à atteindre en matière d'émissions de dioxyde de carbone*

L'enjeu auquel doit faire face aujourd'hui le système énergétique est donc celui de parvenir à répondre à l'augmentation de moitié de la demande d'énergie attendue d'ici 2030, tout en parvenant à stopper le réchauffement de l'atmosphère terrestre. L'arrêt du processus de réchauffement ne peut être que progressif dans la mesure où il suppose de stabiliser la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre (GES) dont la durée de vie peut être particulièrement élevée : un siècle pour le CO₂. Dans ce cadre, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques (GIEC, 2001), les émissions de GES issues des activités humaines doivent être impérativement réduites, en particulier celles de CO₂, principales contributrices du réchauffement de l'atmosphère.

Pour déterminer cet objectif de réduction des émissions de GES, il paraît nécessaire de définir au préalable un niveau d'augmentation des températures que l'on ne souhaite pas dépasser. De ce point de vue, le rapport du GIEC de 2001

ainsi que de nombreux autres travaux plus récents (cités par CAS, 2006) montrent que la limite à ne pas dépasser semble être celle d'une hausse de 2°C de la température moyenne mondiale par rapport à son niveau de 1900, donc compte tenu de la croissance des températures durant le 20^{ème} siècle (+0,6°C). En deçà de cette frontière thermique, on estime que les conséquences du changement climatique restent limitées dans leur ampleur, donc probablement maîtrisables. En revanche, au delà de ce seuil, l'humanité prend le risque de voir apparaître des phénomènes catastrophiques irréversibles puisque autoalimentant les dérèglements climatiques, lesquels ne pourraient plus dès lors être maîtrisés, même au prix d'une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre (CAS, 2006).

Des travaux scientifiques récents (cités par CAS, 2006), portant sur les liens de causalité entre l'évolution des niveaux de concentration atmosphérique des GES et l'évolution de la température moyenne mondiale, montrent que pour avoir une probabilité de 50% de ne pas dépasser une hausse de 2° C, les concentrations de GES doivent être stabilisées à 450 parties par million¹ (ppm) en équivalent CO₂²; si l'on considère

¹ ppm (parties par million) ou ppb (parties par milliard): ratio entre le nombre de molécules de gaz à effet de serre et le nombre total de molécules d'air sec. Par exemple: 300 ppm signifie 300 molécules de gaz à effet de serre par million de molécules d'air sec.

² Pour pouvoir comparer le pouvoir de réchauffement global des gaz à effet de serre, les scientifiques ont mesuré l'augmentation de l'effet de serre induite sur 100

uniquement le CO₂, la concentration doit être limitée à 400 ppm. Atteindre cet objectif de concentration implique de renverser la tendance actuelle : la concentration atmosphérique actuelle de GES est d'environ 430 ppm, contre 280 environ avant 1750 (niveaux préindustriels) ; depuis 1750, elle a donc augmenté de plus de 50% et continue à progresser à un rythme moyen de 0,5% par an (GIEC, 2001).

Stabiliser la concentration atmosphérique de GES à 450 ppm suppose de parvenir à une réduction importante des émissions mondiales de GES le plus rapidement possible. Pour ce faire, il s'agit de ralentir la croissance des émissions pour que celles-ci atteignent leur « pic » dès le milieu de la prochaine décennie et de les faire décroître pour qu'elles retrouvent leur niveau de 1990 en 2030 et qu'elles s'établissent à un seuil 30% inférieur en 2050 (CAS, 2006).

⇒ *La réduction des émissions concerne d'abord les pays développés et donc la France*

Compte tenu des inégalités actuelles de développement et donc d'émissions de CO₂ existant aujourd'hui à l'échelle internationale, et du fait que les pays anciennement industrialisés ont bénéficié d'une sorte de « franchise » gratuite d'émissions polluantes depuis le milieu du 19^{ème} siècle, on peut considérer que cet impératif de réduction des émissions mondiales de CO₂ ne s'impose pas dans toutes les régions du monde de

ans par l'émission d'un kg de chacun des gaz considérés. On constate ainsi que l'émission d'un kg de méthane dans l'atmosphère produit le même effet l'émission de 23 kg de dioxyde de carbone. De même l'émission d'un kg d'oxyde d'azote équivaut à l'émission de 298 kg de dioxyde de carbone. Le CO₂ a été choisi comme étalon de mesure de ce pouvoir de réchauffement. Ainsi, la concentration atmosphérique de l'ensemble des GES est mesurée en tonne-équivalent carbone.

la même manière. Le protocole de Kyoto – première tentative de coordination mondiale des stratégies nationales de réponse à cet enjeu de réduction des émissions – s'inscrit dans cette perspective en ayant exclu de la première phase d'engagement qui s'achèvera entre 2008 et 2012 les pays en développement et émergents.

Une déclinaison plus précise par pays de l'objectif de réduction des émissions de CO₂ en 2050 suppose de rapporter le volume global d'émissions que l'on souhaite atteindre à cet horizon au nombre d'habitants ou au PIB : quelle quantité limite de CO₂ peut être émise par chaque habitant ou pour produire chaque unité de PIB ? Ainsi, à l'horizon 2050, si l'on retient une convergence des émissions par habitant à l'échelle mondiale, les émissions totales de la France devraient être divisées par 6 par rapport à leur niveau actuel, tandis que dans le cas d'une convergence par unité de PIB, l'impératif de réduction n'est plus que 25% pour la France (CAS, 2006).

A partir de ces deux éclairages, la France a choisi de se fixer un objectif intermédiaire avec le « facteur 4 », c'est à dire la division par 4 de ses émissions de CO₂ d'ici 2050 (Groupe « Facteur4 », 2006). En valeur absolue, cela signifie de passer de 145 millions de tonnes de CO₂ en 2004 à environ 36 millions en 2050. Formulé à l'occasion du débat national sur les énergies lancé en janvier 2003 par le ministère de l'industrie et inscrit dans la loi de programme n°2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique¹, cet objectif paraît particulièrement ambitieux lorsque l'on sait

¹ Cette loi affirme explicitement une volonté de préserver la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre, et de contribuer à l'indépendance énergétique nationale française.

que le secteur des transports dépasse actuellement à lui seul ce niveau d'émissions. On peut cependant estimer que les pays qui commenceront avant les autres à s'acheminer vers cette réduction d'émissions de CO₂ auront pris un avantage – diplomatique, moral, mais aussi économique – qui rendra la contrainte supportable (CAS, 2006).

La nécessité de mobiliser simultanément différents leviers technologiques

A l'avenir, aucune filière énergétique ne peut prétendre répondre à elle seule à ce double objectif de réponse à la demande et de réduction des émissions de CO₂, de la même manière qu'aucune ne peut être définitivement écartée. Ainsi, trois principales stratégies technologiques semblent devoir être mises en place dès aujourd'hui.

La première vise à maîtriser la croissance de la demande d'énergie elle-même, par la recherche systématique des économies d'énergies, et d'abord de combustibles fossiles. La seconde vise à modifier le mix énergétique en promouvant les énergies les moins émettrices de CO₂, notamment pour répondre à la croissance (même limitée) de la demande supplémentaire à venir. La troisième part du principe que le recours aux énergies fossiles sera encore très important durant les prochaines décennies et que, en conséquence, il est essentiel de mettre au point des procédés permettant d'éviter que le CO₂ qui continuera à être émis s'échappe dans l'atmosphère ; elle promeut pour cela la voie du stockage souterrain du CO₂.

La sollicitation de ces trois leviers technologiques va dépendre des configurations nationales. L'exposé qui suit s'attache d'abord à éclairer la situation française. Dans le cadre de la loi de programme fixant les orientations de la politique

énergétique, la France s'est donnée des objectifs chiffrés et a défini un certain nombre de programmes mobilisateurs pour les économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables (Assemblée nationale, 2006) :

- la réduction en moyenne de 2% par an d'ici à 2015 de l'intensité finale (rapport entre la consommation d'énergie et la croissance économique) et de 2,5% d'ici à 2030 ;
- la production de 10% des besoins énergétiques français à partir de sources d'énergie renouvelables à l'horizon 2010 ;
- une production intérieure d'électricité d'origine renouvelable à hauteur de 21% de la consommation en 2010 contre 14% actuellement, soit +50% ;
- le développement des énergies renouvelables thermiques pour permettre d'ici 2010 une hausse de 50% de la production de chaleur d'origine renouvelable ;
- l'incorporation de biocarburants et autres carburants renouvelables à hauteur de 2% fin 2005 et de 5,75% d'ici au 31 décembre 2010.

Toutefois, la volonté de la France de s'engager sur la voie d'une réduction drastique de ses émissions de gaz à effet de serre pourrait se voir découragée par la persistance d'une mondialisation de l'économie encore peu soucieuse de la préservation de l'environnement. La faiblesse des objectifs du protocole de Kyoto (valeur de la tonne de CO₂ encore trop basse) et le nombre important de pays non engagés dans cette démarche (dumping environnemental) ralentissent fortement la réévaluation de la compétitivité des efforts de maîtrise de la consommation d'énergie, de

développement des énergies renouvelables¹, de mise en œuvre des procédés de capture et de stockage du CO₂.

Par ailleurs, la mise en œuvre de ces trois leviers technologiques renvoie soit à des enjeux de diffusion de technologies existantes, soit à des enjeux de mise au point de technologies encore à l'état de projet. Plus précisément, les auteurs du rapport sur les « Nouvelles technologies de l'énergie » (Ministère délégué à la recherche, 2004) se sont livrés à un exercice de classification fondé sur le degré de maturité des pistes technologiques envisagées. Trois catégories de technologie sont ainsi obtenues et permettent une vision temporelle de leur délai de pénétration et de viabilité économique :

- A long terme, les technologies de rupture : elles sont encore au stade de la recherche fondamentale et leur réussite n'est pas garantie quels que soient les moyens mis en œuvre ;
- A moyen terme, les technologies de discontinuité : leur viabilité économique est prouvée mais elles nécessitent encore des développements et une meilleure pénétration pour atteindre des réductions de coûts et une généralisation.
- A court terme, les technologies incrémentales : elles ont atteint un stade de développement technologique avancé et viable

commerciallement mais qu'elles ne sont pas encore assez répandues sur le marché.

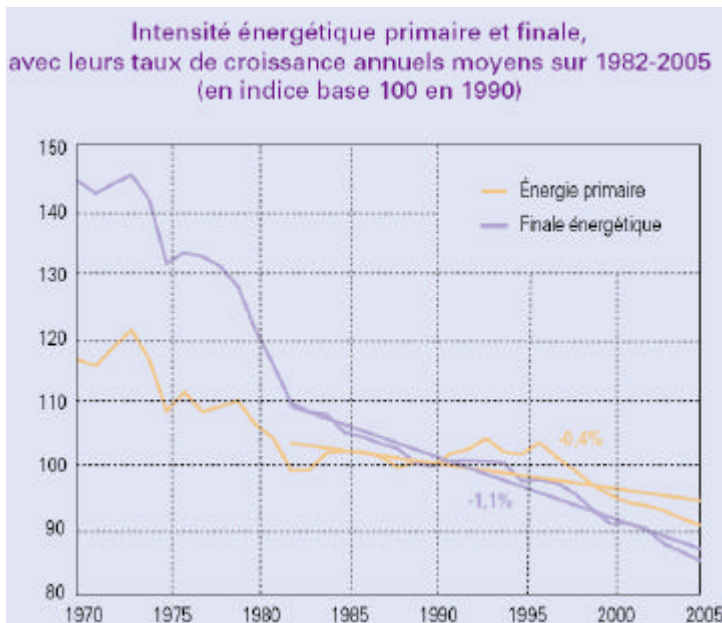
Premier levier technologique : systématiser les économies d'énergies

L'énergie la moins polluante et la moins coûteuse est assurément celle qui n'est pas consommée. Moins consommer ne renvoie pas seulement à la capacité de chaque agents économiques de réduire ses besoins à technologie constante : la limitation de la consommation énergétique par le rationnement ou par la hausse des prix se heurte à un problème d'acceptation sociale dans la mesure où l'énergie est facteur de qualité de vie. Aussi, l'objectif de réduction des consommations d'énergie appelle fortement la mise au point de technologies permettant aux activités humaines (transports, chauffage, production industrielle, production d'électricité...) de s'effectuer en recourant de façon toujours moins intense à l'énergie. Si cette stratégie doit s'appliquer en priorités aux énergies les plus émettrices de CO₂, c'est à dire les énergies fossiles, elle présente un intérêt plus général dans la mesure où elle constitue la voie à suivre pour anticiper la sortie de l'ère de l'énergie bon marché ; autrement dit, les économies d'énergies doivent aussi être considérés comme un facteur de compétitivité pour l'économie française.

De ce point de vue, le contexte des chocs pétroliers des années 1970 a montré que les capacités de réaction sont plus rapides du côté de la consommation d'énergie que de celui de la production (surtout dans un contexte où le secteur de l'énergie est largement libéralisé). La mise en place par le gouvernement d'une stratégie nationale

¹ La hiérarchie des coûts de production du kWh à partir des différentes énergies se trouverait complètement modifiée si l'on tenait compte des coûts externes des différentes énergies. Un rapport récent du Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (2006) indique ainsi que si chaque filière de production d'électricité intégrait le coût de leur émissions de CO₂, dont la tonne serait fixée à 100€, le coût du kW produit par une centrale au charbon augmenterait de 65%, de 25% pour une centrale à gaz cycle combiné, de 15% pour une centrale au fioul.

d'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie dès le premier choc pétrolier (1973) a permis de rompre avec une dynamique qui voyait la croissance de la consommation d'énergie évoluer à la même vitesse que celle du PIB (CAS, 2006). A partir de 1973, ces deux variables vont devenir plus élastique l'une par rapport à l'autre. Ainsi, entre 1973 et 2001, l'intensité énergétique globale de la France a diminué de 35% ; autrement dit, la quantité d'énergie nécessaire pour produire une unité de PIB a baissé de plus d'un tiers. Toutefois, à partir du contre-choc pétrolier de 1986, les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique ont nettement ralenti : de 1973 à 1986, les économies d'énergie ont été estimées à 29 millions de tep/an en moyenne, alors qu'ils ne seront plus que de 3 millions de tep/an pour la période 1986-1999.



Source : Minefi, 2006

Pour de nombreux observateurs, l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'énergie constitue le levier à mobiliser en priorité pour relever le défi énergétique du 21^{ème} siècle. Soulignant que les effets d'une relance des politiques de ce type

peuvent commencer à se faire sentir en 5 ans, P.Radanne (2005) rappelle également que si la stratégie d'économie d'énergie conduite par la France durant les années 1970 et jusqu'au milieu des années 1980 avait été poursuivie, notre pays connaîtrait aujourd'hui une demande énergétique stable tout en parvenant à nourrir une croissance économique de près de 2% par an.

Toutefois, il reste difficile d'établir des prévisions d'économie d'énergie fiables dans la mesure où l'économie réalisée par unité d'énergie consommée peut être utilisée pour satisfaire de nouveaux besoins énergétiques. En effet, les scénarios montrent, en prolongement d'une tendance historique, que le pouvoir d'achat augmente plus vite que le prix des énergies sur le long terme (Groupe « Facteur 4 », 2006).

Quoi qu'il en soit, les dispositifs d'économie pouvant être mise en œuvre dès aujourd'hui, les technologies incrémentales pour reprendre le rapport du Ministère délégué à la recherche (2004), sont les suivants : diffusion de la motorisation hybride ; réduction de la puissances des véhicules ; extension des réseaux de pistes cyclables ; amélioration de l'isolation thermique des bâtiments ; fermeture provisoire des centrales électriques au charbon (avant la mise au point des techniques de capture et de stockage du CO₂) au profit des centrales au gaz à cycle combiné ; généralisation de la cogénération dans les centrales électriques fonctionnant au nucléaire et au gaz. Les autres voies envisagées demandent des durée de développement s'échelonnant jusqu'en 2050 : urbanisme de réseau, bâtiments à « énergie positive », recyclage systématique des biens manufacturés.

Le secteur des transports : développer des véhicules plus économes en carburants

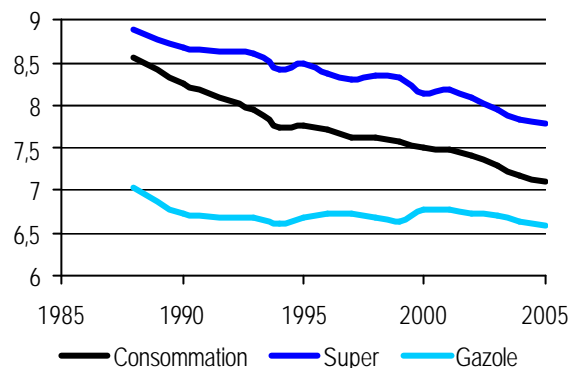
Le secteur des transports est celui dont les émissions de CO₂ ont le plus augmenté depuis trente ans, pour représenter 38,5% de l'ensemble des émissions de la France en 2005. Cette évolution traduit les limites de la stratégie de substitution de l'électricité d'origine nucléaire au pétrole engagée par la France à partir des années 1970. Le secteur des transports demeure en effet fortement consommateur de pétrole – énergie fortement émettrice de CO₂ – dans la mesure où, malgré les chocs pétroliers, le transport routier est devenu le principal contributeur des trafics de personnes et de marchandises : en 2005, les véhicules particuliers génèrent 83,5% des trafics de personnes, quand les transports routiers représentent 78,5% de ceux de marchandises (Ministère de l'équipement, 2006).

Ainsi, alors que tous les autres secteurs d'activités (production, d'électricité, industrie, résidentiel et services, agriculture) ont vu leur consommation de pétrole reculer ces dernières décennies, celle du secteur des transports est passée de 25,7 à 48,9 millions de Tep entre 1973 et 2005 ; la part de ce secteur dans la consommation finale de pétrole de la France est ainsi passée de 30% à 68% sur la période (Minefi, 2006).

Pour autant, cette augmentation des consommations d'énergie du secteur des transports aurait été supérieure si les véhicules terrestres n'avaient pas connu une réelle amélioration de la sobriété de leurs motorisations durant la même période, en raison de l'évolution progressive de la réglementation. Pour ce qui concerne les poids lourds, on constate que leur consommation moyenne est aujourd'hui de 25 litres de diesel aux 100km alors

qu'elle s'élevait à 55 litres dans les années 1950 (T.-G. Breton, P. Kapferer, 2005). Entre 1988 et 2005, la consommation moyenne de carburant aux 100 km des véhicules particuliers neufs, quant à elle, a baissé de 17%, avec une réduction plus forte pour le super que pour le gazole, même si les moteurs diesel ont une consommation moyenne nettement inférieure à celle des moteurs essence (Minefi, 2005 ; CAS, 2006).

Evolution de la consommation des véhicules particuliers aux 100 km en France entre 1988 et 2005 (en litres)



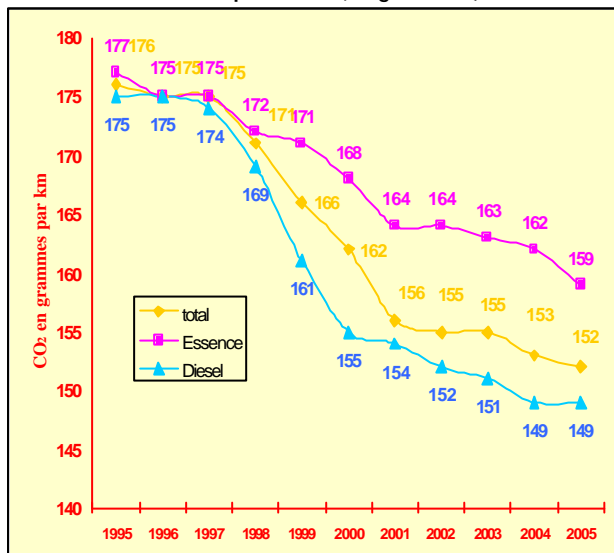
Source : Minefi, 2005

Cette évolution se traduit logiquement par une réduction des émissions moyennes de CO₂ par km parcouru pour les véhicules neufs : entre 1995 et 2005, celles-ci sont passées de 176 à 152 grammes (-13,5%). Cette exigence de réduction des émissions de CO₂ par km est encadrée au niveau européen depuis le milieu des années 1990 par l'accord volontaire des constructeurs européens avec l'union européenne¹ (CAS, 2006). Hélas, ces efforts ont été annulés par l'augmentation du

¹ Un accord volontaire de réduction de ces émissions a été conclu entre l'Union européenne et l'Association des constructeurs automobiles européens (ACEA) qui vise la diminution de 25% en 2008 du niveau constaté en 1995 (soit 140g/km contre 186g/km) et prévoit une étape supplémentaire en 2012 avec -35% (soit 120g/km). La moyenne des constructeurs français se situait en 2003 à 148,5g/km, en comparaison, alors que le taux des véhicules particuliers est de 205g/km aux Etats-Unis (CES, 2006).

nombre¹, du poids moyen² et des vitesses de pointe³ des véhicules, la diffusion de la climatisation⁴, et plus largement l'accroissement des trafics.

Evolution du taux moyen d'émissions de CO2 par km des véhicules particuliers neufs vendus en France depuis 1995 (en grammes)



Source : Ademe, 2006

De ce point de vue, la poursuite du développement de motorisations moins consommatrices de carburants⁵ ne pourra se traduire à l'avenir par une réelle baisse des émissions de CO2 du secteur des transports en l'absence de mesures concomitantes

¹ Le nombre de voitures particulières est passé de 274 pour 1000 français en 1973 à 486 en 2002 et le taux d'équipement des ménages en voitures a progressé de 62% (dont 10% en multi-équipement) en 1973 à 79% (dont 30% en multi-équipement) en 2002 (CAS, 2006).

² En raison de l'amélioration de la sécurité et du confort des véhicules, la masse des véhicules particuliers circulant en France en a augmenté de 15 kg en moyenne par an depuis 1984, soit un poids moyen qui est passé de 900 à 1 200 kg environ (Parlement, 2005).

³ Depuis 1984, la puissance moyenne (kW) des véhicules particuliers circulant en France a augmenté de 38% (Parlement, 2005).

⁴ Autrefois réservée aux véhicules hauts de gamme, la généralisation de la climatisation dans les véhicules neufs entraîne en moyenne un surplus de consommation de 1 litre de carburant pour 100 kilomètres (CES, 2006).

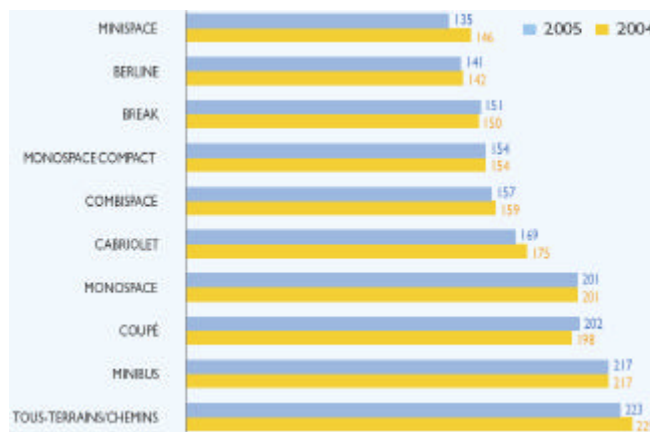
⁵ Notamment pour les véhicules particuliers qui représentent 57% de la consommation de produits pétroliers des transports routiers de personnes et de marchandises en 2004 (Ministère de l'équipement, 2006).

de réduction de la puissance unitaire des moteurs et de substitution modale au profit de moyens de transport économes en énergie (cf. point suivant). Ces évolutions sont d'autant plus fondamentales et urgentes que : tous les scénarios de réduction par 4 des émissions de CO2 de la France impliquent que la part du pétrole dans les transports devienne inférieure à 1/3 de l'énergie finale du secteur (MIES, 2004) ; le renouvellement complet du parc automobile nécessite une période de 20 à 30 ans (Parlement, 2005).

⇒ Une mesure générique pour l'ensemble des transports terrestres : le « downsizing » des puissances de motorisation

Il s'agit d'un fait incontestable, les véhicules particuliers les plus légers, c'est à dire les moins luxueux, sont les moins consommateurs d'énergie au km et donc les moins émetteurs de CO2 (Ademe, 2006). Comme le suggère P. Radanne (2005), un compromis devra être trouvé entre la liberté individuelle de déplacement et la réduction des émissions de gaz carbonique, au travers de la redescende en gamme des véhicules et une limitation accrue des vitesses autorisées.

Moyennes des émissions de CO2 par km des véhicules neufs vendus en France par type de carrosserie (en grammes)

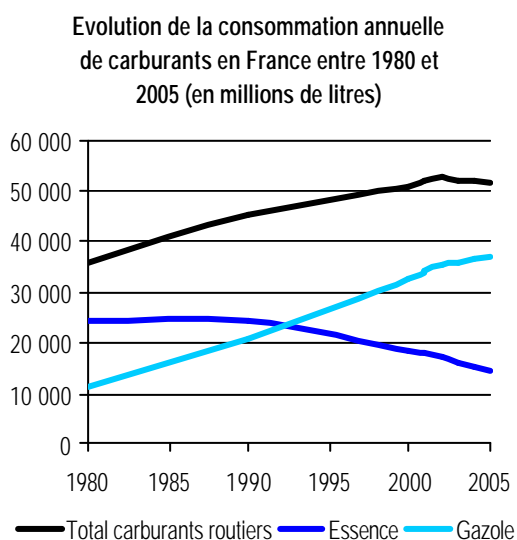


Source : Ademe, 2006

Cette évolution peut être réalisée tout en maintenant la puissance et le couple des moteurs grâce à la généralisation de la suralimentation par turbocompresseur. Il s'agit d'un dispositif qui permet de récupérer l'énergie disponible à l'échappement sur une turbine pour entraîner un compresseur, qui introduit l'air d'admission sous pression. L'augmentation de la quantité d'air introduite permet alors de brûler d'avantage de carburant et donc de produire plus d'énergie. Le remplacement d'un moteur atmosphérique par un moteur turbocompressé permet théoriquement de réduire de 21% la consommation d'un moteur fonctionnant à l'essence (Parlement, 2006)

⇒ *L'amélioration des moteurs conventionnels*

Le moteur à combustion interne reste, selon tous les experts consultés, la pierre angulaire de l'automobile pour plusieurs décennies encore. Dès lors, l'enjeu de la réduction des émissions de CO₂ passe par la conception de voitures conventionnelles consommant de moins en moins de carburants. Selon l'IFP, la principale source d'économie de carburant renvoie à l'amélioration du rendement du moteur, et plus largement de la chaîne de traction (Parlement, 2005).



A cet égard, les moteurs diesel présentent un intérêt supérieur, puisque leur rendement est plus élevé que celui des moteurs à essence ou à gaz. La diésélisation du parc – la part des moteurs diesel dans les ventes annuelles de véhicules particuliers en France est passée de 33% à 69% entre 1990 et 2005 (Ademe, 2006) – a déjà permis de limiter significativement les consommations et les émissions globales de gaz à effet de serre (CCFA, 2006). Il paraît donc pertinent de favoriser le renforcement de la part des véhicules diesel dans le parc d'automobiles particulières, à la condition de garantir l'approvisionnement en carburant par la substitution croissante du gazole par des biocarburants (Parlement, 2005).

Sur un plan strictement technologique, les performances du moteur diesel reposent sur la maîtrise de l'injection directe à haute pression et de la suralimentation permettant le « downsizing » (réduction de la puissance du moteur sans pertes de performances mécaniques). Dans ce cadre, les progrès futurs reposent sur quatre voies principales (Parlement, 2005 ; CES, 2006) :

- L'amélioration de l'injection directe :

Elle doit permettre d'optimiser le mélange air/carburant. Elle est d'autant plus efficace que le carburant est sous pression, injecté de la manière la plus précise possible en termes de quantité et de moment. Pendant de nombreuses années l'injection était assurée par un système mécanique lié à chaque cylindre qui assurait en même temps la mise sous pression ; les quantités et le moment de l'injection n'étaient donc pas modulables. Une évolution sensible a été effectuée par les systèmes d'injection électronique qui ont permis de séparer la mise sous pression de

l'injection. La mise sous pression continue d'être réalisée de manière mécanique, tandis que les injecteurs commandés électroniquement libèrent ou non le trou d'injection par une impulsion électromagnétique. L'injection électronique a également permis de mettre au point une injection multiple : au lieu d'injecter en une seule fois le carburant, celui-ci est introduit dans le cylindre en plusieurs fois, de trois à cinq actuellement. Ces injections ont pour objectif de réduire les bruits de cliquetis, de mettre sous pression la chambre, d'assurer le meilleur mélange et la meilleure combustion possible et enfin de maintenir une pression élevée. Elles permettent donc de réduire le bruit, d'augmenter le rendement du moteur et d'en diminuer les émissions polluantes. Ces dispositifs pointus ne peuvent fonctionner que grâce à de nombreux capteurs permettant de connaître l'évolution exacte du fonctionnement du moteur (température, pression, position du piston) mais aussi du circuit d'échappement (taux d'imbrûlés...).

- L'amélioration de la suralimentation :

Elle consiste à équiper la turbine du turbocompresseur d'un système à géométrie variable, des ailettes orientables déviant le flux des gaz entrants. Leur orientation est pilotée par un calculateur qui optimise la récupération de l'énergie en fonction du régime du moteur. Le couple du moteur est ainsi plus élevé à haut comme à bas régime.

- La réduction des frottements :

La chasse aux frottements fait aussi partie des sources d'amélioration continues du rendement des automobiles. De nombreuses recherches

sont effectuées sur la réduction des frottements dans les moteurs, et en particulier dans les pistons. Par ailleurs, les manufacturiers de pneumatiques travaillent à la réduction de la résistance au roulement et ont déjà obtenu des avancées significatives grâce notamment aux évolutions de structure des carcasses et des mélanges de gomme.

- La mise au point d'un nouveau mode de combustion :

Une rupture plus nette pourrait être atteinte en cas de succès des programmes de recherche engagés au niveau international sur le mode de combustion. Deux programmes européens intitulés HCCI (Homogeneous Combustion Compression Ignition) pour le diesel et CAI (Controlled Auto Ignition) pour l'essence visent à contrôler le temps d'autoallumage, la vitesse et la température pour optimiser le mélange et la combustion. Ils projettent une réduction de l'ensemble des émissions polluantes de 90% par rapport aux moteurs actuels, à l'horizon 2015-2020.

⇒ *La voiture hybride, une technologie clef à moyen et long termes*

L'hybridation consiste à combiner deux énergies pour assurer la propulsion d'un véhicule. On appelle donc hybride tout véhicule qui, en plus de sa source d'énergie primaire, dispose d'un stockage réversible d'énergie sous une seconde forme. Sur les véhicules hybrides actuels, il s'agit essentiellement du mariage du thermique comme source principale d'énergie et de l'électrique comme complément ; mais cette solution est aussi utilisée pour les voitures à hydrogène qui sont également des hybrides électrique-hydrogène. L'adjonction d'un moteur électrique et d'une puissante batterie permet

d'optimiser le fonctionnement du moteur thermique ou de le remplacer momentanément et donc de réduire la consommation et les émissions. Toute la difficulté technique est de réussir un fonctionnement bimode harmonieux et pour un coût limité. Il existe plusieurs niveaux et fonctionnalités d'hybridation du soft au full, généralement dénommés par leur terminologie anglo-saxonne (Parlement, 2005).

- Le premier niveau correspond au « Stop & start » de Valeo commercialisé sur la Citroën C3. A l'arrêt, un dispositif électrique, un alterno-démarrreur, permet la mise en veille du moteur et le redémarrage après relâchement de la pédale de frein. Ce dispositif permet de réduire les émissions de CO₂ de 8% en moyenne.

- Le second niveau ajoute le freinage récupératif. Il consiste à récupérer l'énergie cinétique du véhicule lorsque la voiture freine ou décélère, au lieu de la dissiper sous forme de chaleur dans les freins. Cette énergie est stockée dans une batterie appropriée et restituée ensuite. Très difficile à réaliser dans la pratique, cette opération permet de réduire les émissions de CO₂ de 13% en moyenne.

- Une troisième fonctionnalité est l'optimisation du moteur thermique. Le principe est de le faire tourner à son niveau de rendement optimal, de stocker l'énergie dans les batteries lorsqu'elle est excédentaire et de la restituer lorsqu'elle est insuffisante, notamment dans les phases d'accélération. Le moteur électrique permet un surcroît de puissance et évite la surconsommation du moteur thermique au moment de l'accélération. L'hybridation peut donc également permettre de diminuer la cylindrée du moteur thermique pour arriver à des réductions d'émissions de l'ordre de 30%.

- Enfin, un véhicule hybride peut être propulsé entièrement en mode électrique sans intervention du moteur thermique (fonction « E-drive » sur la Toyota Prius). Ce dispositif complet devrait permettre de réduire les émissions de CO₂ de 45% en moyenne.

L'hybridation offre ainsi une réponse de taille aux problèmes de surconsommation posés par l'utilisation des véhicules en cycle urbain, utilisation qui représente 70% des trajets automobiles. L'utilisation urbaine, et plus largement les courts trajets (50% des déplacements automobile ne dépassent pas les 3 kms), renvoient à des situations dans lesquelles le moteur met du temps à atteindre sa température normale de fonctionnement, avec pour conséquence le fait qu'un véhicule roulant à 10 km/h émet, pour parcourir la même distance, trois fois plus de gaz à effet de serre qu'un véhicule roulant à 60 km/h.

Parmi les hybrides les plus aboutis, disponibles à l'achat dans les concessions, se trouvent les modèles produits par les constructeurs japonais Honda et Toyota, et notamment la Toyota Prius Hybrid Sinergy drive qui sélectionne constamment la source d'énergie (essence ou électricité) la plus rentable en fonction du type de déplacement. (CES, 2006). Cependant, parce qu'elle consiste à combiner une motorisation thermique et une motorisation électrique, la technologie hybride est encore chère : en France, la Prius est commercialisée entre 25 000 et 29 000€. La diffusion des véhicules hybrides reste aujourd'hui limitée. Toyota a commercialisé 385 000 Prius dans le monde depuis son lancement en 1997. Fin juillet 2005, il y en avait moins de 2 000 en France et de 19 000 en Europe. Honda a commercialisé 100 000 hybrides depuis six ans. Le marché évolue

cependant rapidement. Entre 2003 et 2004, le marché a doublé : 166 000 hybrides ont été vendus en 2004 dont 78% par Toyota et 17% par Honda (Parlement, 2005).

Au total, encore marginale dans la rue, la technologie hybride n'est déjà plus ignorée par aucun constructeur dans la mesure où elle offre l'avantage de pouvoir s'insérer parfaitement dans les circuits de fabrication et de distribution des véhicules et d'être couplée avec l'ensemble des améliorations portant sur les moteurs thermiques. La montée de la concurrence dans ce secteur devrait rapidement faire baisser le prix d'achat, lequel devrait faire l'objet d'un amortissement accéléré dans un contexte de hausse continue du prix du pétrole. Les ventes devraient progresser fortement mais de manière contrastée selon les marchés. Aux États-Unis et au Japon où le diesel est peu présent, la progression devrait être très forte. En revanche, en Europe, l'hybride devrait progresser plus lentement en raison des performances actuelles des moteurs diesel et de leur faible coût. Le succès à venir de cette filière sera également fortement lié à l'amélioration des performances des batteries, celle-ci étant essentielle pour parvenir à une hybridation plus complète¹. Plusieurs observateurs estiment d'ailleurs que la convergence de la filière hybride et de la filière tout électrique permettrait de résoudre de façon décisive les limites que rencontre chacune d'elles. Le principe d'un véhicule offrant la possibilité de rouler exclusivement à l'électricité

¹ Si les batteries actuelles nickel-métal hydrure (Ni-MH) offrent beaucoup de puissance, elles ne permettent pas une grande autonomie. Une étape supplémentaire devra donc être franchie vers plus de performance et un moindre coût grâce à l'utilisation de batteries lithium-ion (Li-ion) produites à grande échelle (Parlement, 2005).

dans le cadre des déplacements urbains quotidiens tout en permettant de recourir à la motorisation thermique classique sur de plus grandes distances constitue en effet une perspective hautement prometteuse (cf. point sur la voiture électrique).

⇒ *L'amélioration des autres paramètres de la consommation d'énergie des véhicules*

La réduction des consommations intrinsèques des véhicules routiers peut être obtenue non seulement par une amélioration des performances des motorisations, mais également de la modification de différentes caractéristiques du véhicule que sont principalement la masse, l'aérodynamique ou encore l'isolation thermique (CES, 2006 ; Parlement, 2005).

Comme il n'est pas envisageable de revenir en arrière sur tous les acquis réalisés en termes de sécurité, d'habitabilité et de confort – qui jusqu'ici ont alourdi les véhicules – la réduction du poids des automobiles passe par des calculs de structure encore plus élaborés et par l'utilisation de matériaux légers. La puissance de calcul désormais disponible au moment de la conception permet de ne mettre que la quantité de matière nécessaire à l'endroit voulu pour garantir la résistance avec le poids minimum. Les tôles à très haute limite élastique permettent également de diminuer les épaisseurs tout en conservant la rigidité. Les matériaux légers comme les alliages d'aluminium sont de plus en plus utilisés.

Le travail sur l'aérodynamique est également un gisement de progrès : l'affleurement des vitres, l'ancrage des rétroviseurs sont autant de détails qui permettent d'influer sur le coefficient de pénétration dans l'air. Cependant, les véhicules à assise haute (4x4, monospace...) qui connaissent actuellement un fort succès commercial y compris en milieu

urbain ont un profil qui ne permet pas d'obtenir un (Cx) coefficient de pénétration dans l'air très performant.

L'isolation thermique des véhicules est un autre grand défi partout où les systèmes de climatisation se sont développés, en raison de l'impact de ces dispositifs sur la consommation. De nombreux travaux sont menés sur ce sujet, dont les avancées sont progressivement introduites sur le marché. Des chercheurs californiens de Berkeley ont réussi à réduire de 75% le besoin de refroidissement et de 85% le besoin de réchauffement d'une voiture Ford Taurus par l'utilisation de systèmes d'isolation : des isolants en aluminium avec des cellules vides en nids d'abeille emprisonnant de l'air pour la partie métallique de l'habitacle du véhicule ; un double vitrage de polycarbonate ou d'acrylique revêtu à l'intérieur d'un revêtement limitant l'impact du rayonnement solaire.

⇒ *La question spécifique de la motorisation des avions*

Le transport aérien est une composante singulière du système de transport dans la mesure où il est sans concurrence pour le transport de passagers sur longue distance et où il connaît les croissances de trafic les plus marquées. Résultat de la mondialisation de l'économie et de l'essor du tourisme international, le trafic aérien s'élève aujourd'hui à 1,8 milliard de passagers par an dans le monde avec une croissance annuelle de 5%. Il assure également 40% de l'échange international de marchandises et ce trafic croît lui aussi régulièrement. Cette augmentation du trafic provoque des hausses de consommation collatérales dues à l'encombrement des espaces aériens au-dessus des aéroports (Parlement 2006). La France n'est pas en reste face à ces tendances

puisque, sur la période 1990-2002, le trafic aérien avec l'étranger s'est accru de 109% et les émissions de CO₂ liées de 58,5% (CGPC, 2005). La croissance du trafic aérien métropolitain entre 1990 et 2005 est en revanche beaucoup plus modeste (+13%) : après s'être nettement accru durant les années 1990, le trafic aérien métropolitain a en effet sensiblement reculé (-18%) depuis 2000 sous l'effet de la concurrence du TGV (Ministère de l'équipement, 2006).

Face à la forte progression de leur trafic à l'international et à la dépendance complète des moteurs d'avion vis à vis des hydrocarbures (kérosène), les compagnies aériennes française sont conduites à rechercher des moyens pour maîtriser leur consommation d'énergie. Air France s'est par exemple fixé comme objectif de limiter le taux de croissance de ses émissions de CO₂ à la moitié de celui du trafic : par exemple, 2% pour les émissions pour une croissance de 4% du trafic (CGPC, 2005).

Pour remplir ce type d'objectif, deux voies principales sont envisagées :

- L'optimisation de la consommation :

Elle passe tout d'abord par des mesures de limitation de la masse embarquée : limitation de la quantité de kérosène embarqué par multiplication des pleins dans les aéroports d'escale et ajustement à la masse réellement embarquée (procédure « Pleins partiels ») ; élimination progressive du double emport par la mise en place d'un catering¹ local dans les aéroports de destination et la limitation de la masse d'eau emportée ; utilisation de containers plus légers... L'optimisation de la

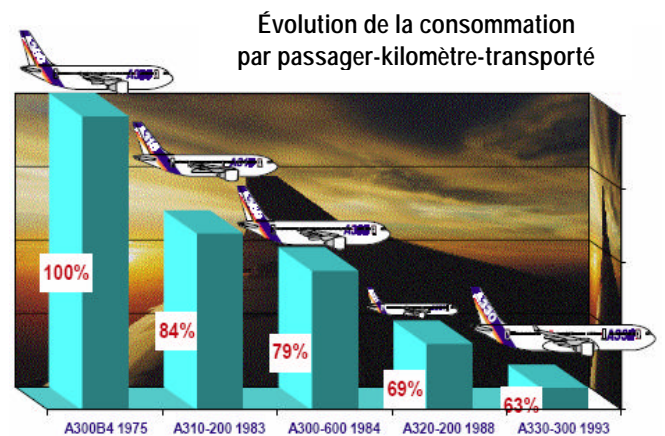
¹ Le catering recouvre l'ensemble des activités liées aux services à bord, et notamment la restauration.

consommation renvoie également à l'amélioration de l'entretien des moteurs et de la carlingue : réglages, nettoyages...

- Le renouvellement des flottes par des appareils moins consommateurs :

La composition de la flotte a un impact direct sur la part des dépenses de kérosène dans les charges totales : elle est de 10% pour les compagnies exploitant des appareils de nouvelle génération mais de 30% pour des compagnies exploitant des appareils plus anciens. Or, actuellement, si 39,5% de la flotte est constituée d'appareils de nouvelle génération (de conception postérieure à 1980), 40,5% sont de « mid-generation » (appareils des années 70) et 20% d'ancienne génération. L'importance des appareils de mi-génération et d'ancienne génération est surtout significative en Amérique du Nord (70%), en Afrique (72%) et en Asie (52%) mais relativement faible en Europe (48%) surtout pour les avions d'ancienne génération (7%).

L'intérêt du renouvellement des flottes aériennes traduit le fait que les progrès de l'avionique dans le domaine des réacteurs (chambres de combustion) comme dans celui de la conception générale des avions (introduction de matériaux composites, réduction du poids du mobilier...) ont permis de réduire de près 40% la consommation de carburant par passager-kilomètre-transporté en moins de 20 ans (CGPC, 2005).



Le secteur des transports : développer les modes de transports de passagers et de marchandises alternatifs à la route

Un autre moyen de réduire la consommation d'énergie dans le secteur des transports consiste à opérer un report modal vers les moyens de transports les plus économes : les transports ferrés et fluviaux et les modes doux (vélo, marche à pieds). Si ce type d'évolution a déjà lieu pour ce qui concerne les transports intérieurs à longue distance de passagers – le trafic TGV (172 200 voyageurs-km/tep) domine désormais nettement celui de l'avion (18 200 voyageurs-km/tep) pour les trajets de moins de trois heures¹ – elle est en revanche loin d'être engagée en matière de transports urbains de voyageurs et de transports à longue distance de marchandises. En effet, les investissements nécessaires au développement d'une offre alternative à la route pour ces deux types de transport ne peuvent suffire en tant que tel. Le report effectif suppose que la demande soit au rendez-vous. Or, plusieurs facteurs contribuent à la croissance de la demande de transports routiers en

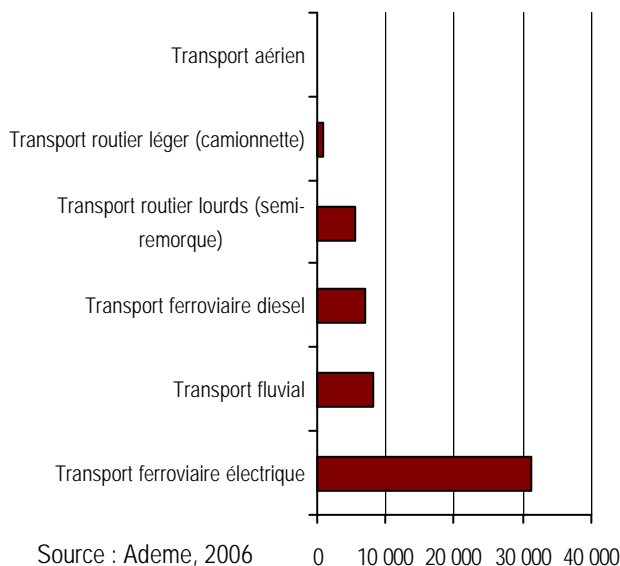
¹ Le train représente 86% de parts de marché pour des parcours en TGV de l'ordre de 2h (cas du Paris-Lyon/Nantes), 65% pour des parcours de 3h (Paris-Marseille/Bordeaux/Londres) et 45% pour des parcours de 4h (E.Barci, A.Bernusset, N.Coulombel, 2004)

France, pour les personnes comme pour les marchandises (P.Radanne, 2005): l'essor des temps de loisirs, un fonctionnement en flux tendus de l'économie mondialisée, la concentration de l'emploi de service dans les agglomérations urbaines alors que l'habitat se desserre avec la périurbanisation. La mise en œuvre de mesures visant à infléchir certaines de ces tendances paraît donc indispensable.

⇒ *Renforcer le recours au fret ferroviaire pour le transport de marchandises à longue distance*

Le chemin de fer électrique apparaît clairement comme le mode le plus efficace pour le transport de marchandises: une tonne-équivalent-pétrole lui permet de transporter plus de 30 000 tonnes-kms¹, contre 6 000 tonnes-kms dans le cas du transport routier lourd et seulement 250 tonnes-kms pour l'avion (F.Moisan, 2006).

Efficacité énergétique des différents modes de transports interurbains de marchandises en France en 2000 (en tonne-km/tep)



Dès lors, il paraît séduisant de promouvoir un important report modal des transports routiers vers

¹ Unité de mesure correspondant au transport d'une tonne sur une distance d'un kilomètre.

les transports ferroviaires. Il s'agirait ainsi d'infléchir la tendance actuelle qui, à l'inverse de ce que l'on peut observer à l'échelle européenne, voit la réduction constante de la part de marché du ferroviaire sur le marché du transport de marchandises: celle-ci est passée de 23,5% en 1985 à 13% en 2005 (Ministère de l'équipement, 2006). Cette volonté de report se heurte cependant à une limite incontournable (Parlement, 2006): le croisement des courbes de coût des transports de marchandises par rail et par route s'opère au bénéfice du rail que pour les distances supérieures à 500 kilomètres², alors que les trois quarts du trafic européen de marchandises s'effectuent sur des trajets de moins de 200 kilomètres (95% en France). Seule la possibilité de franchissement d'obstacles naturels permet d'accroître l'intérêt du ferroviaire sur de plus courtes distances. Malgré tout, l'objectif d'un report modal accru sur longue distance conserve un intérêt important en France. Notre pays, plus que tout autre en Europe, est confronté: d'une part, à un transit routier international qui, outre les nuisances qu'il engendre, ne produit aucune richesse et ne couvre que partiellement ses coûts d'usage des infrastructures; d'autre part, à l'obligation d'assurer une desserte sans faille de ses ports maritimes à laquelle le transport routier ne pourra répondre seul (CES, 2006).

Dans ce cadre, il s'agit d'optimiser l'articulation entre transports ferroviaires à longue distance et desserte régionale et locale par la route. C'est l'objet de la notion d'intermodalité, ou transport combiné, qui associe les avantages de

² Il faut cependant anticiper le fait que, au fur et à mesure que les prix du pétrole augmenteront, le point d'équilibre entre les deux modes de transport sera plus bas (Parlement, 2006).

massification des modes de transport lourds aux avantages de souplesse et de capillarité du transport routier en recourant à des unités de chargement homogène¹ (CES, 2006).

En termes d'infrastructures, le développement du transport intermodal implique en premier lieu de raisonner à la bonne échelle, c'est à dire à l'échelle européenne. En effet, indépendamment du réseau de base constitué des trois axes majeurs nationaux que sont le Lille-Paris-Lyon-Marseille, le Lille-Paris-Bordeaux-Hendaye et le Lille-Paris-Toulouse-Perpignan sur lesquels le Fret SNCF s'est concentré dans le cadre de son plan de retour à l'équilibre financier 2004-2006, seul le marché européen paraît à même d'assurer la meilleure intensité d'utilisation du capital ferroviaire et le meilleur coefficient de remplissage du transport combiné (CES, 2006). Cette approche européenne suppose tout d'abord de répondre à l'enjeu de l'unification des réseaux à l'échelle européenne : du fait de l'existence de trois largeurs de rail, de cinq systèmes électriques et de vingt systèmes de signalisation différents, la vitesse d'un transport ferroviaire de marchandises entre la Pologne et l'Espagne évolue entre 20 et 30 km/h (Parlement, 2006). Au delà, il paraît essentiel que l'Union européenne prenne la responsabilité de la mise en œuvre d'un programme d'équipement d'ampleur dans ce domaine, en créant deux axes de ferroutage à grande distance, sur le trafic Est-Ouest et le trafic Nord-Sud (Parlement, 2006).

Située au cœur de ces axes d'échanges, la France est appelée à prendre des initiatives fortes à ce sujet. L'Etat a ainsi annoncé en novembre 2005

plusieurs mesures visant à développer l'offre de transport combiné rail/route :

- la SNCF devrait recevoir un soutien à hauteur de 800 millions d'euros au total pour améliorer les performances du fret ferroviaire, qui fait l'objet jusqu'à présent de nombreuses critiques en ce qui concerne son manque de ponctualité et de flexibilité ;
- une autoroute ferroviaire de plus de mille kilomètres, entre Luxembourg et Perpignan, devrait ouvrir en mars 2007 ;

Au total, la question du développement du transport combiné rail/route conduit à poser celle de la répartition des crédits entre les projets d'infrastructures autoroutières et ceux concernant par exemple les contournements ferroviaires des agglomérations de Paris, Lyon, Dijon, Nîmes, Bordeaux ou Toulouse. A cet égard, la mission sur l'effet de serre de l'Assemblée nationale (2006) préconise de juger les projets en prêtant une attention accrue à leurs effets en termes d'émissions de CO₂. En ce sens, elle recommande de ne pas donner suite aux projets de doublement des autoroutes nord-sud.

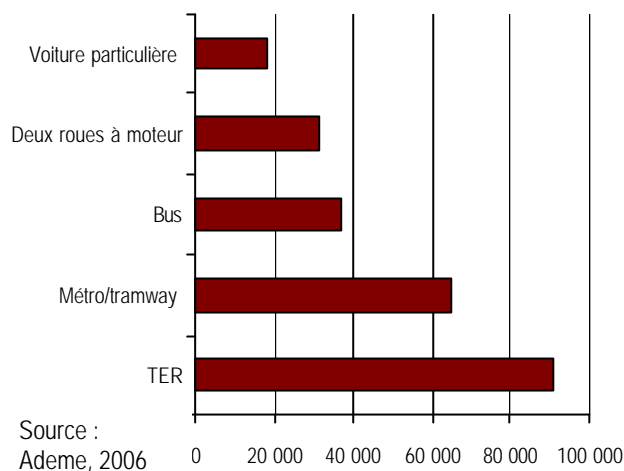
⇒ *Accroître la part modale des transports en commun dans les aires urbaines*

Le chemin de fer électrique est également le mode le plus efficace pour le transport de marchandises : une tonne-équivalent-pétrole lui permet de transporter plus de 90 000 voyageurs-kms², contre 18 000 voyageurs-kms dans le cas de la voiture particulière (Ademe, 2006).

¹ Un conteneur maritime, une caisse mobile terrestre, voire une remorque ou semi-remorque accompagnée ou non de son véhicule moteur.

² Unité de mesure qui équivaut au transport d'un voyageur sur une distance d'un kilomètre.

Efficacité énergétique des différents modes de transports urbains de voyageurs en France en 2000 (en voyageur-km/tep)

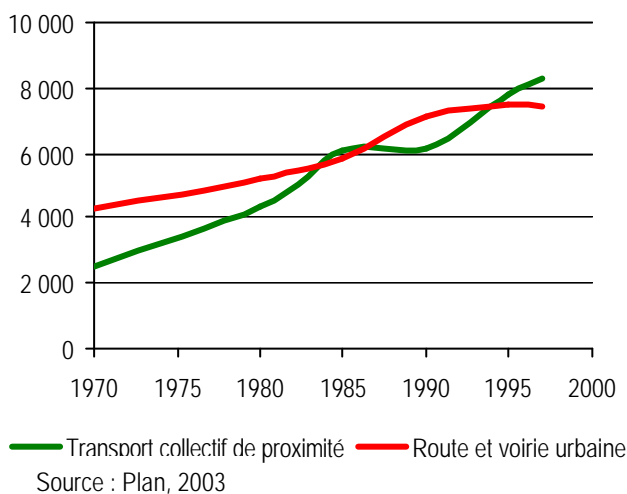


L'intégration des Transport Express Régionaux (TER) dans la problématique des transports urbains se justifie, d'une part, par le fait qu'ils desservent souvent plusieurs points d'une même agglomération (cet aspect n'est pas réservé à la région parisienne), et d'autre part, par le rôle essentiel qu'ils jouent dans la formation des métropoles multipolaires que l'on observe aujourd'hui (FNAU, 2006). Autrement dit, si l'on estime que les territoires urbains comprennent aujourd'hui, non seulement les agglomérations et l'espace périurbain qui les entourent, mais également les polarités secondaires qui se trouvent dans leur aire d'influence, les TER tiennent effectivement une place importante dans la mise en réseau des différents pôles qui composent un bassin de vie. Dans ce cadre, il paraît cependant nécessaire de distinguer deux types d'enjeux en terme de report modal : la substitution du train à la voiture pour les relations interpoles ; la substitution des transports en commun (métro, tramway, bus) à la voiture pour les déplacements internes aux agglomérations. Le premier enjeu renvoie d'abord à une amélioration du rythme de desserte sur les tronçons

métropolitains : Villefranche-sur-Saône/Vienne, Saint-Étienne/Bourgoin-Jallieu, en passant par Lyon, par exemple en région lyonnaise. Le projet « Réseau Express de l'Aire urbaine Lyonnaise » initié par le Conseil Régional Rhône-Alpes s'inscrit dans cette perspective. Lancé en septembre 2005, il vise à mettre le cadencement des services ferroviaires régionaux d'ici fin décembre 2007 et une tarification multimodale d'ici 2009. Il s'agit autrement dit de faire passer des trains tous les jours à la même heure, au même rythme, en assurant la correspondance avec les bus. Cette démarche semble d'autant plus prometteuse que les TER rencontrent un succès grandissant ; ils offrent en effet des performances souvent supérieures à l'automobile pour relier deux centres urbains. Depuis la régionalisation de leur gestion, les TER connaissent ainsi un trafic en forte croissance : +6,5% en moyenne à l'échelle de la France en 2005, +9% en Rhône-Alpes (Insee, 2006). La substitution des transports en commun à la voiture, quant à elle, apparaît aujourd'hui comme plus problématique. La période récente montre en effet que la part des transports collectifs dans les déplacements urbains reste à un niveau relativement modeste malgré les investissements lourds qui ont été effectués depuis les années 1990 (Plan, 2003). En 2002, notamment, 26 villes françaises ont réalisé ou décidé de réaliser la construction de transports collectifs en site propre (métro, tramways, tram-train, bus). On peut estimer que la répartition des crédits entre projets d'infrastructures routières et projets d'infrastructures de transport collectif ne fait pas encore l'objet d'une inflexion forte en faveur des seconds. L'impact des nouveaux investissements dans les transports en

commun est en effet d'autant plus limité que l'offre en matière d'infrastructures routières continue de s'accroître. Ainsi, selon la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (2004), en l'état des politiques de transports routiers et d'urbanisme, un doublement de l'offre de transports publics ne permettrait de déplacer que 8% du trafic routier.

Evolution des dépenses des administrations publiques en transport entre 1970 et 1997 (en millions d'euros)



Ce constat reflète le fait que les trafics automobiles au sein des agglomérations conservent un important potentiel de croissance dans la mesure où ils sont continuellement alimentés par les flux en provenance des communes périurbaines. Autrement dit, si le renforcement de la part modale des transports en commun appelle, au delà de l'extension de leur réseau, un traitement spécifique des trafics automobiles internes aux agglomérations selon des principes de préservation des espaces centraux – piétonisation des rues, mises en place de péages urbains, réduction de la taille des voiries, mise en place de parkings-relais en bout de réseau – il ne peut faire l'impasse de la question de la maîtrise en tant que telle des flux induits par la périurbanisation, laquelle suppose des politiques

volontaristes en matière d'urbanisme (cf. point suivant sur l'urbanisme durable).

⇒ *Promouvoir les déplacements à vélo dans les agglomérations urbaines*

En modifiant durablement la forme de nos villes, en transformant les rues en routes, en allongeant les distances et en contribuant à la spécialisation des espaces, la voiture a produit un système qui a marginalisé les autres modes de déplacement, et notamment les modes dits doux (marche à pied, vélo).

Dans le contexte énergétique et environnemental actuel, il paraît incontournable de réhabiliter la place de la bicyclette dans le système de transport (B.Le Brethon, 2004). Sur les trajets courts inférieurs à 5 Km ou, combiné avec les transports collectifs, pour des trajets plus longs dans les grandes agglomérations ou inter villes, le vélo est souvent plus performant que la voiture (flexibilité, stationnement...). A titre individuel, la pratique quotidienne du vélo pendant une demi-heure permet d'améliorer sa santé : associée à une alimentation saine et diversifiée, celle-ci suffit à diminuer par deux le risque d'infarctus, de maladies coronariennes et de certains cancers. D'une manière générale, le vélo bénéficie dans notre pays d'un réel capital de sympathie entretenu par les grands rendez-vous sportifs. Enfin, la promotion des déplacements à vélo peut constituer un volet essentiel des politiques en faveur de la mobilité des populations défavorisées.

Le rapport remis au 1^{er} ministre en 2004 par le Député BLe Brethon propose un objectif de 10% des déplacements urbains effectués en vélo à l'horizon 2010. Pour atteindre cet objectif, ce rapport, ainsi que celui publié en 2003 par le

Commissariat général du plan, suggèrent que soient mises en œuvre plusieurs mesures :

- Faire une place plus large au vélo sur l'espace public en encourageant le développement des réseaux de pistes cyclables (étendue, continuité, cohérence, sécurité) et des zones 30 en villes.
- Renforcer l'offre de stationnement pour les vélos, sur l'espace public (Etablissements d'enseignement, zones commerciales...) mais également dans les immeubles collectifs.
- Développer l'intermodalité « vélo + transports en commun », notamment dans les zones périurbaines, en fixant des normes de stationnement vélo dans les gares et stations de transports collectifs et offrant la possibilité d'emmener son vélo sur les réseaux eux-mêmes.
- Impulser la réalisation des Plans de déplacements d'entreprise et la prise en compte du vélo dans ces plans.

Plus largement, le succès des politiques en faveur des déplacements à vélo repose sur la mise en cohérence des politiques de déplacements et avec celles concernant le logement, les zones d'activités et de commerces. Parce qu'elle peut permettre d'anticiper l'usage du vélo dans la desserte des nouveaux espaces urbanisés, cette mise en cohérence paraît incontournable pour parvenir à un report modal massif au profit de la bicyclette. La recherche de cette cohérence est au fondement de ce que l'on peut appeler « urbanisme durable ».

⇒ *Un impératif pour garantir la modification de la répartition modale dans les territoires urbains : l'urbanisme durable*

Les orientations évoquées précédemment en matière de report modal dans les agglomérations

urbaines peuvent être facilitées par certains éléments de contexte qui jouent cette fois-ci en faveur de la modération de la croissance du trafic (P.Radanne, 2005) : renchérissement du prix du pétrole, congestion urbaine accrue, budget-temps des individus qui n'est pas illimité, réduction des déplacements pour démarches administratives et achats avec le développement d'Internet. Mais, les véritables facteurs qui peuvent être à l'origine d'un report modal massif vers les transports les plus économes, donc les moins émissifs de CO₂, concernent plus sûrement les fondements structurels de la demande de déplacements urbains, c'est à dire l'évolution de la distance moyenne entre les lieux d'habitation et les lieux d'emplois, de commerces et de services.

La diffusion de l'automobilité au sein des ménages – entre 1950 et 2000, le nombre de voitures particulières en circulation en France a été multiplié par plus de dix et il est passé de 274 pour 1000 français en 1973 à 486 en 2002 (CAS, 2006) – et l'extension constante des réseaux routiers – la longueur totale du réseau routier du pays s'élève aujourd'hui à 610 000 km, dont 25 000 km de routes nationales et 11 000 km d'autoroutes (Ministère de l'équipement, 2006) – ont offerts des possibilités de déplacements toujours accrues. Conjuguées avec l'évolution des modes de vie des Français (individualisation des trajectoires de vie, essor du temps libre...), ces deux processus se sont traduits par un desserrement important de l'habitat depuis une quarantaine d'années.

Jusque dans les années 1990, la classification élaborée par l'Insee pour décrire les territoires urbains distinguait les espaces urbains des espaces ruraux exclusivement sous l'angle de la concentration spatiale de populations sédentaires

(B.Chabanel, 2004) : la commune concernée répond-elle aux critères définissant la notion d'« unité urbaine »¹ ? Cette approche permet de rendre compte de l'urbanisation de la population française : entre 1936 et 1999, la population des unités urbaines a doublé, passant de 22 millions d'habitants à 44 millions, soit une augmentation de 100% alors que la population française métropolitaine n'augmentait que de 40%. La part de la population urbaine dans la population totale est donc passée de 52,9% en 1936 à 75,5% en 1999. Mais, deux éléments viennent nuancer ces observations. D'une part, le doublement de la population urbaine relevé entre 1936 et 1999 s'est fait au prix de la multiplication par plus de 2,7 de la superficie des territoires urbains qui passe de 36 000 à 100 000 km². D'autre part, la croissance de la population urbaine s'est très nettement ralentie sur la période 1968-1982, en raison certes du tarissement du phénomène de l'exode rural, mais aussi, et de plus en plus fortement, du fait de la périurbanisation qui se traduit, depuis le recensement de 1975, par un solde migratoire négatif pour les communes urbaines.

Pour prendre la mesure de ce processus de périurbanisation, l'Insee a mis au point une nouvelle classification des territoires urbains en 1997 s'appuyant sur l'hypothèse que la périurbanisation

est d'abord et avant tout le reflet de stratégies de migration résidentielle dissociant de façon croissante la commune-lieu de résidence et la commune-lieu d'emploi. Cette hypothèse est confirmée par le fait que, en 1999, 61% des actifs travaillent hors de leur commune de résidence alors qu'ils n'étaient que 52% en 1990. Dans cette perspective, la nouvelle classification permet de délimiter des aires urbaines au sein desquelles il faut distinguer le pôle urbain – constitué d'une unité urbaine offrant au moins 5 000 emplois et dont les actifs travaillent à plus de 30% en son sein – de la couronne des communes dites périurbaines – dénombrées selon le principe en vertu duquel 40% au moins de leur population active occupée travaillent dans le pôle ou dans des communes attirées par celui-ci. Cette classification permet de mettre en évidence le double phénomène suivant (B.Chabanel, 2004) : une concentration accrue de l'emploi dans les pôles urbains (62% en 1962 contre 72% en 1999) ; un desserrement continu de la population active vers les communes périurbaines (10,5% en 1962 contre 15,5% en 1999).

Au final, cette dispersion de la population dans les communes sous influence urbaines conduit à un accroissement très net de la distance moyenne des déplacements entre le domicile et le lieu de travail, lequel participe largement à la croissance de la distance totale parcourue quotidiennement² : en moyenne, les Français parcouraient 35,5 km par jour en 1994, au lieu de 16,3 en 1973 (CGPC,

¹ Concrètement, selon les normes recommandées au niveau international, sont qualifiées d'urbaines toutes portions d'espace agglomérant au moins 2 000 habitants et dans un cadre bâti dont les composantes ne doivent être séparées de plus de 200 mètres. En France, l'Insee désigne par les termes d'« unité urbaine » chacune de ces agglomérations de population au sein d'un espace bâti resserré : l'unité urbaine est une commune ou un ensemble de communes qui comporte sur son territoire une zone bâtie d'au moins 2 000 habitants où aucune habitation n'est séparée de la plus proche de plus de 200 mètres.

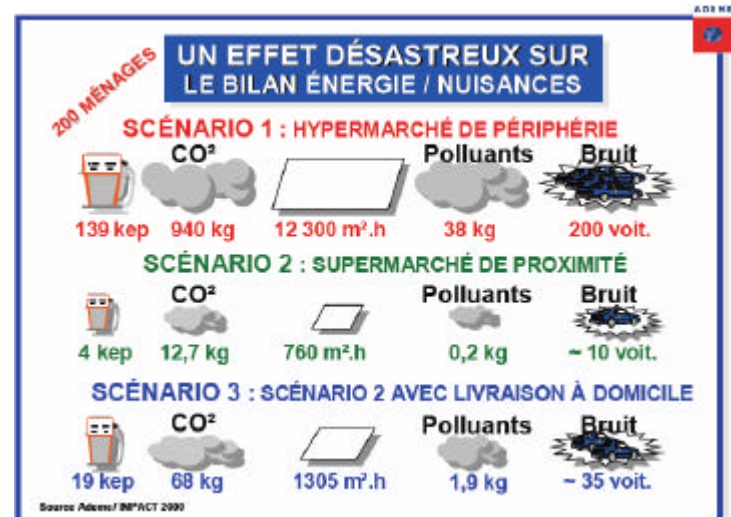
² On sait qu'une part importante de la croissance de la distance moyenne parcourue quotidiennement est liée également à l'accroissement du temps libre et du nombre de retraités. Autrement dit, à côté de l'éloignement des lieux d'habitat et des lieux d'emplois, il faut aussi tenir compte de la croissance forte des déplacements de loisirs et de tourisme (CGPC, 2006).

2006). Cet allongement des distances parcourues alimente directement la demande d'automobilité dans la mesure où les réseaux de transports en commun ne peuvent qu'imparfaitement desservir la population dispersée des communes périurbaines, à l'exception notable de celles qui possèdent une desserte ferroviaire. Par ailleurs, il est important de noter que, grâce à l'extension constante des réseaux routiers, cette croissance de la distance parcourues quotidiennement se fait à budget-temps constant: au fil des enquêtes portant sur les comportements de déplacement, on observe que le temps consacré chaque jour aux déplacements par chaque individu se maintient dans une moyenne d'une heure.

Une approche plus concrète des conséquences de l'étalement sur l'évolution des émissions de CO2 issues des transports est offerte par les travaux de l'Ademe (2006) portant sur les différentes possibilités d'approvisionnement commercial qui s'offrent aux ménages des aires urbaines. Trois scénarii ont été étudiés: le premier est celui de l'approvisionnement traditionnel auprès des commerces de proximité des zones denses des villes (ravitaillés par camions et auxquels l'on se rend à pieds); le second scénario est emblématique de l'urbanisme conçu pour l'automobile puisqu'il correspond à la fréquentation des hypermarchés de périphérie d'agglomération (ravitaillés par camions et auxquels l'on se rend en voiture); le troisième scénario est plus émergent dans la mesure où il répond au développement des achats sur Internet dont la livraison à domicile est le pendant (celle-ci s'effectue par l'intermédiaire de camionnettes). La comparaison de ces trois scénarii sur le plan des émissions de CO2 est significative. L'approvisionnement des hypermarchés, puis

l'utilisation de la voiture particulière afin que les ménages de banlieue puissent effectuer leurs courses hebdomadaires, génèrent des émissions polluantes, une consommation d'espace et une pollution sonore sans commune mesure avec la situation d'un approvisionnement dans un supermarché de proximité, où de petites courses (6 kg) sont effectuées régulièrement par les ménages. Le scénario 3 est un scénario intermédiaire qui se révèle tout de même beaucoup plus efficace que le scénario 1.

Ces différentes analyses conduisent au constat plus



général selon lequel la densité, plus ou moins élevée, de l'urbanisation aurait un effet direct sur la consommation d'énergie et donc le niveau

d'émissions de CO2 des territoires considérés. Un rapport récent du Centre d'Analyse Stratégique (2006) rappelle ainsi les résultats d'une étude confrontant, pour différentes métropoles mondiales, densité de population et niveau de consommation d'énergie par personne : d'une manière générale, plus la densité d'une ville est élevée et plus sa consommation d'énergie par habitant est faible. Dans ce cadre, la maîtrise de la demande à venir de déplacements – en terme de distance puisque le nombre de déplacements reste stable dans la durée – ainsi que sa prise en charge par les modes les plus économes d'énergie impliquent à l'évidence une stratégie volontariste de réorganisation de la répartition spatiale des activités (emplois, logements, services, commerces, loisirs).

Rapport entre densité de population et consommation d'énergie par habitant dans plusieurs métropoles mondiales



Source : CAS, 2006

Trois grands principes d'urbanismes sont aujourd'hui consolidés pour répondre à cet enjeu (Agence d'urbanisme de Lyon, Grand Lyon, 2005).

- La mixité des fonctions : l'une des raisons essentielles de l'accroissement des distances parcourues réside dans la spécialisation fonctionnelle des nouveaux espaces urbanisés, à la différence de la ville historique. Zones

pavillonnaires, zones commerciales, zones industrielles, pôles des services ne se recoupent rarement. Les nouveaux espaces urbanisés devraient répondre désormais à ce critère de mixité des fonctions afin de promouvoir les déplacements courts par des modes collectifs ou doux (vélo, marche).

- La densification des tissus urbains : la question de la densité renvoie à une vision de ville qui serait à nouveau celle des courtes distances spatiales et non plus seulement temporelles. Cette vision évoque plus ou moins consciemment une époque où la ville fonctionnait sans l'automobile : c'est parce qu'elle devait sans cesse se refaire sur elle-même (pour maintenir la possibilité d'atteindre les différentes fonctions urbaines à pieds) que la ville historique possède l'attrait patrimonial qu'on lui reconnaît aujourd'hui. Autrement dit, comme le décrit David Mangin (2005), les centres urbains et leur faubourg sont le fruit d'un processus historique de sédimentation non planifié des différentes étapes du développement urbain, sédimentation qui produit une « épaisseur temporelle » dont raffolent les amoureux des villes. Dès lors, il serait possible de trouver une nouvelle convergence entre attrait de la ville et densification maîtrisée des tissus urbains. Infléchir le mouvement de périurbanisation passerait ainsi par un travail de mise en valeur des territoires urbains existant, et en premier lieu des zones d'urbanisation prioritaires aménagées durant les années 1960 et 1970. David Mangin plaide pour des stratégies de densification progressive s'appuyant sur la capacité de mutabilité des tissus urbains. Selon

lui, cette démarche passe par le « re-maillage » de ces derniers selon un schéma plus fin, réhabilitant la notion de rue piétonne.

- Réseaux et polarités comme armature urbaine :

Pour beaucoup d'observateurs, l'effort de mixité et de densité doit s'organiser à partir des réseaux de transports en commun. L'urbanisation devrait prioritairement s'établir autour des points de desserte existants (stations de métro et tramway, gares SNCF). Au delà, il paraît désormais incontournable d'assortir les zones d'extension urbaine d'une desserte systématique en transports en commun.

bâtiments, consommation des appareils électriques et d'éclairage) et l'utilisation des énergies renouvelables (cf. partie suivante). Dans cet ensemble « résidentiel-services », la priorité va au secteur résidentiel qui représente 2/3 des consommations d'énergie.

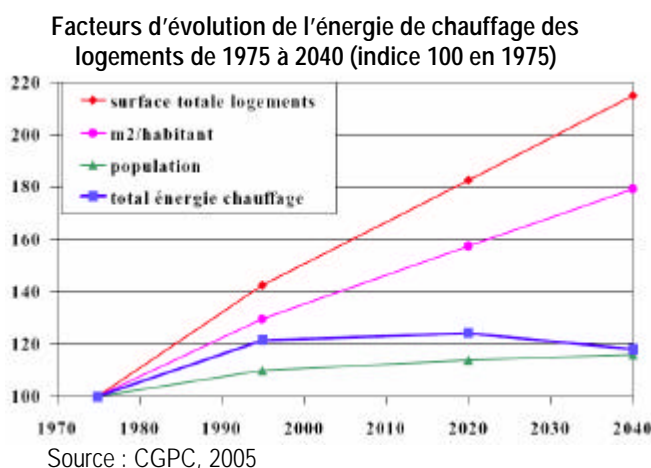
Le secteur résidentiel et des services : développer l'efficacité énergétique des bâtiments et de leur équipement

Le secteur résidentiel et des services voit ses émissions de CO₂ se réduire sur longues périodes, ces trente dernières années, mais reprendre leur croissance depuis les années 1990. Elles représentent un quart de l'ensemble des émissions de la France en 2005, soit la deuxième contribution après celle du secteur des transports. L'habitat constitue donc l'autre grand gisement potentiel de réduction des émanations de CO₂ avec celui des transports. D'autant plus intéressant à privilégier qu'il se tient, pour l'essentiel, à l'abri de la concurrence internationale et des risques de délocalisation (Assemblée nationale, 2006).

La division par quatre, dans le secteur du bâtiment, des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ associées, est possible dès maintenant d'un point de vue technique, par la diffusion des dispositifs d'économie d'énergie (isolation des

⇒ *Mettre au point des dispositifs d'isolation thermique toujours plus performants et adaptables au parc existant*

Les progrès accomplis en matière d'économies d'énergie ont été très importants depuis trente ans dans le secteur résidentiel et des services. Les besoins de chauffage représentant 70% des besoins énergétiques du secteur (Ministère délégué à la recherche, 2005), la réglementation thermique, instituée en 1975 et progressivement sévéri­sée (jusqu'en 1988 puis seulement à partir de 2000), a permis de diviser par deux la consommation énergétique au m² des bâtiments neufs, même si aucun contrôle n'a été effectué de la bonne application de ces réglementations (CAS, 2006).



Ce « succès dans le neuf » prend tout son sens dans la mesure où il a permis, et permet encore aujourd'hui, de répondre de façon plus efficace à la croissance des besoins d'énergie thermique induit par la croissance continue du parc bâti en France¹.

¹ Le parc de logement croît en effet de 1% en moyenne par an et celui de bureaux de 2% (MIES, 2004). En termes de surface, avec l'accroissement du phénomène de décohabitation des couples et la recherche d'un confort accru, on prévoit que la surface des logements aura crû de 20 m² par personne en 1960 à 35 m² en 2050 (Assemblée nationale, 2006) ; la surface occupée par les services publics et privés quant à elle s'élève aujourd'hui à 700 millions de m². Les besoins d'énergie du secteur du logement progressent d'autant plus que la

Ainsi, la consommation d'énergie pour le chauffage des logements a peu augmenté de 1975 à 2000 comparativement à la progression de la surface de plancher du parc sur la même période (CGPC, 2005).

De ce point de vue, il paraît indispensable de poursuivre le processus de durcissement de la réglementation thermique pour les bâtiments neufs, celui-ci stimulant la mise au point de nouveaux dispositifs technologiques permettant de réduire les consommations d'énergie thermique du m² bâti. L'horizon technologique est ainsi celui du bâtiment à énergie positive combinant les principes de l'architecture bioclimatique – meilleure distribution intérieure des pièces (pièces de vie au sud), isolation extérieure renforcée (mise au point de panneaux d'isolation sous vide permettant de diminuer par 10 les pertes caloriques des bâtiments), dallages intérieurs permettant de stocker la chaleur, placement étudié des baies vitrées au sud, plantations adaptées (protection contre le vent en façade nord, arbres à feuilles caduques en façade sud) – avec les apports des énergies renouvelables – géothermie, solaire thermique et photovoltaïque, petit éolien (J.L.Bal et B.Chabot, 2006 ; Parlement, 2006). Le bâtiment assure alors ses propres besoins, réduits par son isolation (15 à 20 kWh/an de pertes thermiques contre 100 kWh/an avec les réglementations thermiques actuelles), et l'énergie non consommée est restituée dans le réseau.

Toutefois, de nombreux observateurs, tels que le Conseil Général des Ponts et Chaussées (2005) ou l'Assemblée nationale (2006), alertent sur le très

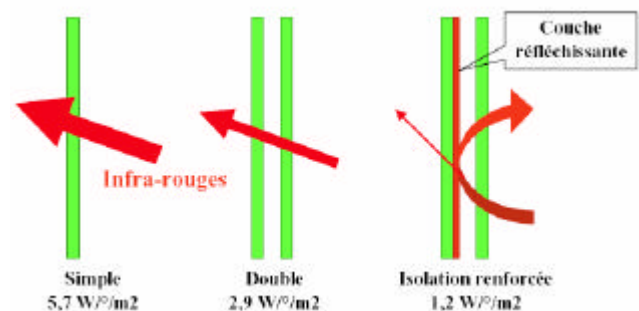
composition de celui-ci fait état de la domination de l'habitat individuel (57% du parc en 2000) au détriment de l'habitat collectif ; les maisons individuelles sont en effet plus consommatrices d'énergie (Minefi, 2003).

faible rythme de renouvellement du parc bâti actuel : il faut un siècle pour que l'ensemble du parc de logement soit renouvelé, si bien que 65% du parc actuel ont été construits avant 1975, c'est-à-dire avant la mise en place des réglementations thermiques. Si on extrapole l'état du parc en 2050, un tiers seulement des logements présents aura été construit depuis l'année 2000¹. Ce constat conduit à donner la priorité aux actions de rénovation pour atteindre l'objectif de réduction des émissions de CO2 que s'est fixé la France : selon l'Assemblée nationale (2006), il faudrait rénover l'équivalent de 400 000 logements par an jusqu'en 2050 ; selon l'ADEME, il suffit que chaque ménage français dépense entre 15 000 et 30 000 euros d'ici 2050 pour des travaux spécifiques d'isolation et d'équipement en dispositifs à énergies renouvelables, la fourchette inférieure correspondant à la somme que dépensent déjà actuellement les Français chaque année pour l'ensemble des travaux consacrés à leur logement (M.H. Laurent et N.Recosio, 2007).

D'un point de vue technologique, ce constat conduit à reconnaître que les marges de gain de performance thermique à attendre à l'avenir sur le neuf resteront faibles comparativement à celles que laissent espérer l'adaptation des technologies d'isolation thermique au parc existant ; même la proposition de ralentir la construction de logements individuels au profit de l'habitat collectif afin de freiner la croissance des surfaces consommées par habitant aurait un impact énergétique très restreint du fait de la diminution continue des « consommations unitaires par surface de

plancher » dans le neuf (CGPC, 2005). Par ailleurs, il apparaît que, si la mise en œuvre d'un plan de rénovation ambitieux du patrimoine ancien présente certes un intérêt strictement énergétique, cette démarche constituerait également une réelle avancée en matière de confort des occupants, d'innovation technologique, de création d'emploi (Assemblée nationale, 2006). Il s'agit donc de promouvoir, par un système d'incitations et de subventions, des actions de rénovation par anticipation de l'isolation des toits et des fenêtres des bâtiments, laquelle représente 2/3 des pertes de chaleur constatées. Il s'agit d'opérations à coûts négatifs, c'est à dire intégralement financées par les économies d'énergies obtenues par la suite (CGPC, 2005).

Comparaison des déperditions de chaleur selon la qualité des vitrages



Source : CGPC, 2005

Le potentiel d'amélioration est particulièrement important en ce qui concerne le vitrage. Il paraît urgent de retirer du parc le simple vitrage au profit à minima du double, voire du vitrage à isolation renforcée (VIR) : vitrage double dont le verre intérieur possède un revêtement réfléchissant le rayonnement infrarouge vers l'intérieur de la pièce. Les gains escomptés sont considérables puisque, entre le simple vitrage et l'isolation renforcée, les déperditions sont presque divisées par cinq. Apparue dans les années 1980, cette technologie s'est diffusée dans certains pays, comme

¹ Autrement dit, il est illusoire d'espérer améliorer la performance énergétique des bâtiments existants en les remplaçant par des bâtiments neufs (donc plus performants) en quelques décennies.

l'Allemagne où elle occupe près de 100% du marché des vitrages en 2004, contre 50% en France, où la réglementation thermique n'est pas encore arrivée à l'imposer dans les bâtiments neufs (CGPC, 2005). Pour mesurer l'enjeu de la généralisation de la technologie de l'isolation renforcée, il faut savoir que le surcroît de « puissance de chauffage » dû aux m² de vitrage ordinaire installés sur la seule année 2004 équivaut à la puissance de la totalité des éoliennes installées en France depuis l'origine jusqu'à fin 2004.

⇒ *Promouvoir les technologies de chauffage fonctionnant aux énergies non renouvelables les plus économes*

Si la diffusion des systèmes de chauffage fonctionnant grâce aux énergies renouvelables paraît indispensable (cf. partie suivante), elle suppose cependant le maintien de dispositifs complémentaires permettant de produire de la chaleur lorsque l'apport des énergies renouvelables se révèle insuffisamment continu et puissant. Ceci conduit à s'interroger sur les performances des systèmes de chauffage traditionnels.

Aujourd'hui, il est tout d'abord clairement reconnu que l'utilisation de dispositifs tout électriques est à bannir dans la mesure où le fonctionnement de ceux-ci forment des pics de consommation qui sont en général pris en charge par des centrales électriques fonctionnant au gaz ou au charbon. On observe par ailleurs que les chaudières au fioul ont été pratiquement éradiquées du parc bâti actuel. Dès lors, les chaudières au gaz constituent les systèmes de chauffage à énergie fossile les plus répandus en France. Les travaux du CGPC (2005) montrent que les technologies les plus performantes en la matière sont aujourd'hui sont :

- Les chaudières basse température : en fonctionnant à température plus basse, elles apportent plus d'économies et une ambiance thermique plus agréable. Par rapport à une chaudière moderne standard, elles permettent de réaliser des gains de consommation de l'ordre de 12 à 15%. Si elles alimentent un plancher chauffant basse température ou des radiateurs « chaleur douce », ces chaudières procurent une sensation de confort particulièrement agréable. Elles s'adaptent aux émetteurs existants s'ils sont surdimensionnés, ce qui est fréquent.

- Les chaudières à condensation : en condensant la vapeur d'eau des gaz de combustion, elles récupèrent de l'énergie. D'où une notable économie de combustible, moins de gaz carbonique et moins d'oxydes d'azote produits. Elles améliorent de 15 à 20% les résultats des chaudières standard modernes. Encore peu installées en France, elles représentent une part importante des matériels posés en 2001 au Pays-Bas (83 %) ou en Allemagne (33 %). Ces chaudières atteignent leurs meilleures performances et procurent un grand confort quand on les installe avec un plancher chauffant basse température et/ou des radiateurs « chaleur douce ».

⇒ *Accroître l'efficacité énergétique des appareils fonctionnant spécifiquement à l'électricité*

Au sein des consommations d'énergies du secteur « résidentiel et services », l'électricité spécifique désigne tous les services énergétiques que « seule » l'énergie électrique peut théoriquement rendre : éclairage, électroménager, multimédia, automatisation... L'électricité spécifique a depuis

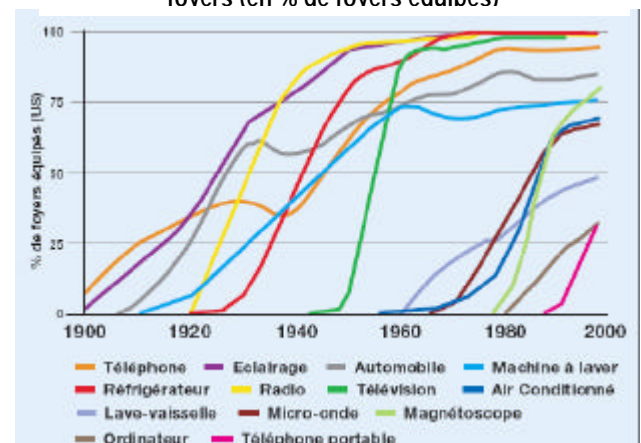
peu dépassé la production d'ECS (eau chaude sanitaire) en devenant le deuxième poste de consommation énergétique des logements. En effet, la consommation d'énergie par logement baisse ou stagne pour l'ensemble des postes (chauffage, ECS, cuisson) depuis le milieu des années 1970 sauf pour l'électricité spécifique qui connaît à l'inverse une croissance soutenue, en France comme dans tous les pays européens (M.H. Laurent et N.Recosio, 2007).

L'essor de la consommation d'électricité spécifique n'est pas lié à l'évolution des consommations de l'électroménager. En effet, présents de longue date dans les foyers et les bureaux, les produits électroménagers ont fait l'objet d'améliorations non négligeables pour ce qui concerne leurs consommations d'énergie. En lien avec la création par l'Union européenne d'un label de consommation (de A à G, en fonction décroissante de l'efficacité énergétique), les fabricants d'électroménager ont fait des efforts constants de diminution de consommation des équipements qu'ils proposent. Ainsi la consommation des machines à laver a baissé de 44% en 20 ans et celle des réfrigérateurs (le froid représente plus de 39% de la consommation d'électricité d'un ménage) de 60 % depuis 1993 (Parlement, 2006). De nouvelles améliorations de ces performances sont sans doute possibles mais les gains à attendre sont moins importants que par le passé.

Ce n'est pas non plus l'éclairage qui explique la croissance de la consommation d'électricité spécifique. Toutefois, ce poste possède un potentiel d'économie d'énergie plus important que pour les produits blancs. Une diminution de moitié de la consommation d'électricité pour l'éclairage pourrait être obtenue par la généralisation de l'emploi des

meilleures technologies existantes (Parlement, 2006): lampes fluocompactes (-80%), lampes dichroïques (-40%) avec des durées de vie des ampoules plus longues. De même, une plus grande attention portée au pouvoir réflecteur des luminaires serait susceptible de diminuer de 20% l'énergie dépensée dans les bureaux. On peut également mentionner les systèmes annexes comme les détecteurs de présence qui interrompent l'éclairage dans les couloirs. A terme, les technologies des diodes électroluminescentes (DEL) présentent des potentiels intéressants (300 lumen/w contre 10 lumen/w pour les simples lampes à incandescence et 80 lumen/w pour les lampes fluo).

Diffusion des appareils électriques au sein des foyers (en % de foyers équipés)



Source : Total, 2006

Ce sont donc les équipements de multimédia (image, son informatique, communication) qui expliquent largement l'envolée de la consommation d'électricité spécifique. Alors qu'il constitue depuis vingt ans un secteur d'équipement en pleine expansion¹, le secteur multimédia n'a pas fait l'objet du même effort d'économie d'énergie que pour les produits électroménagers. D'une manière générale,

¹ La consommation d'électricité liée à l'usage des produits bruns (télévision, magnétoscope, hi-fi...) est passée de 18 KWh/logement en 1973 à 321 KWh/logement en 1998 (Minefi, 2003).

la consommation des appareils multimédia n'est pas prise en considération dans les décisions d'achat. Il en résulte que leurs rendements ne sont pas optimisés lors de leur conception (Parlement, 2006). Ceci est particulièrement dommageable dans la mesure où ces appareils font l'objet de consommations parasites lorsqu'ils restent en veille en dehors de leur période d'utilisation effective. Ces consommations peuvent être importantes, de l'ordre de 100 à 800 KW/h par an pour un ménage. On estime ainsi que la veille des appareils électriques représenterait jusqu'à 10% de la facture d'électricité des ménages en France. Les produits multimédia présentent donc le plus important potentiel de réduction des consommations d'électricité spécifique, d'autant plus que leur rythme de renouvellement est sensiblement plus rapide (V.Lamblin, 2006). On estime notamment que les consommations de veille peuvent être divisées par cinq en limitant, sans surcoût, la puissance de veille des appareils mis sur le marché à un watt (M.H. Laurent et N.Recrosio, 2007).

⇒ *Mettre au point une gestion intelligente de la consommation d'énergie des bâtiments*

Selon V.Lamblin (2006), d'importants gains d'énergie peuvent être obtenus par l'utilisation de dispositifs électroniques optimisant les processus de fonctionnement et l'utilisation des systèmes de chauffage, d'éclairage et des appareils électriques : programmation automatisée de certaines demandes aux heures creuses (sèche-linge, chauffe-eau...) ; programmation de températures différenciées suivant les pièces dans l'habitat ; détecteur de présence permettant l'arrêt automatique d'écrans, de la lumière, de veilles inutiles ; gestion automatisée de sources énergétiques complémentaires (énergies renouvelables, énergies

classiques). La réduction constante des coûts de l'électronique – doublement de la puissance des composants électroniques tous les 18 mois pour un coût équivalent – devrait en effet permettre une utilisation toujours plus diffuse.

Le secteur de l'industrie : développer le recyclage

Bien que le secteur de l'industrie ait déjà entamé depuis plus de 20 ans un effort de rationalisation énergétique – ses émissions de CO₂ sont en réduction constantes depuis trente ans et représentent 22%¹ de l'ensemble des émissions de la France en 2005 – des avancées substantielles sont encore à attendre en matière d'économie d'énergie en s'attaquant aux besoins d'énergie eux-mêmes.

On sait que moins il y a besoin d'extraire et de transformer de matières premières et moins il y a besoin d'énergie. Dans ce cadre, un raisonnement égoïste et irresponsable voudrait que l'on encourage la délocalisation des industries les plus consommatrices d'énergie dans les pays émergents : la réduction de l'intensité énergétique (quantité d'énergie consommée par unité de PIB) de la croissance économique des pays anciennement industrialisés que l'on observe ces dernières décennies s'expliquent aussi par la dématérialisation de leur économie, c'est à dire le recul de la part des activités économiques fortes consommatrices d'énergie (sidérurgie, métallurgie, chimie lourde). Mais cette stratégie ne fait que transférer le problème sans le supprimer à l'échelle mondiale.

¹ Ces émissions comprennent également celles de l'agriculture.

Le véritable enseignement à tirer de l'observation du rapport entre transformation de la matière et consommation d'énergie est qu'il existe un champ d'économie d'énergie très important avec le recyclage des biens manufacturés (véhicules, électroménagers, vêtements, appareils audiovisuels...) et des matériaux usagés (acier, aluminium, verre, papier, plastiques). En effet, le recyclage exige moins d'énergie que la première fabrication (Bobin J.L., Huffer E. et Nifenecker H., 2005). Dans cette perspective, la systématisation du recyclage conduit à la mise en place définitive d'une économie industrielle de service dans laquelle on n'achète plus un bien mais seulement le service qu'il rend. Parce qu'il demeure la propriété de son fabricant, le bien est d'emblé conçu comme recyclable, c'est à dire réinjectable dans le processus de production une fois qu'il atteint ses limites d'usage (défaut de fonctionnement, performances obsolètes). Ce modèle de l'économie de fonctionnalité est présenté par ailleurs comme source de relations durables entre clients et prestataires : la relation de service auquel il donne lieu est source d'amélioration constante de la prestation pour le client et de rentrée financière plus régulières – les « loyers » – pour le prestataire (D.Bourg, N.Buclet, 2005).

Par ailleurs, au sein du secteur industriel, la production de chimie de base apparaît comme l'activité la plus consommatrice d'énergie, les procédés exigent de nombreuses étapes de séparation, coûteuses en énergie et peuvent consommer des combustibles énergétiques comme matières premières (CES, 2006). Développer des procédés énergétiquement performants dans ce secteur est possible. Sur la base d'une étude menée par l'ADEME, les efforts sont à orienter sur

quatre postes (que l'on retrouve dans la plupart des industries grandes consommatrices d'énergie) : le fonctionnement mécanique (groupe froid, moteurs électriques...), la séparation de produits (filtration, séparation de solvants...), la génération de vapeur (centrale vapeur, chauffage de produits...) et le conditionnement des locaux (éclairage haute efficacité...).

Le secteur de la production d'électricité : améliorer le rendement des processus de transformation des énergies primaires en énergies finales

Avec la mise en place de la filière du nucléaire civil en France, le secteur de la production d'énergie a vu ses émissions de CO₂ se réduire fortement depuis trente ans ; elles représentent en 2004 12,6% de l'ensemble des émissions de CO₂ de la France. Toutefois, des performances accrues peuvent être obtenues en améliorant le rendement des centrales de production d'électricité classiques, qui ne dépasse pas les 35%, quelle que soit la filière¹. Aujourd'hui, deux pistes complémentaires existent pour améliorer le rendement de la filière au gaz : le cycle combiné et la cogénération.

L'emploi du cycle combiné dans les centrales au gaz consiste à appliquer les progrès réalisés dans les moteurs d'avion pour l'entraînement des

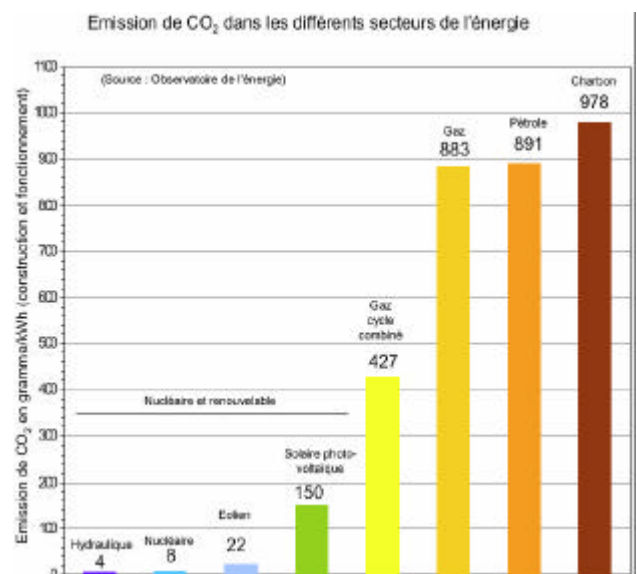
¹ Ce constat est valable pour le système énergétique dans son ensemble. Le rendement de celui de la France reste faible : en 2000, pour satisfaire un besoin d'énergie utile de 86 millions de tep (Mtep), 252 Mtep ont été nécessaires, ce qui correspond à un rendement de 34% environ. 166 Mtep ont ainsi 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 CO₂ (Ministère délégué à la recherche, 2004).

turbines génératrices d'électricité. Dans les centrales thermiques, on obtient traditionnellement l'électricité en faisant tourner des turbines à l'aide de la vapeur produite par une source de chaleur alimentée en brûlant un combustible fossile. Une partie importante l'énergie thermique produite est perdue. Au début des années 1980, des progrès sur les matériaux utilisés par l'industrie aéronautique ont permis de réaliser des turbines à gaz fonctionnant à haute température (environ 900°C). On a donc conçu des turbines utilisant directement les gaz chauds résultant de la combustion du gaz naturel. A la sortie de la turbine, les gaz sont encore suffisamment chauds pour être utilisés dans une chaudière à vapeur, laquelle fait tourner une autre turbine. L'association de la turbine à gaz et de la turbine à vapeur constitue le cycle combiné qui permet d'atteindre des rendements de conversion en électricité de plus de 50%. Aujourd'hui, le cycle combiné au gaz naturel constitue d'ores et déjà la principale technologie de production de l'électricité mise en service dans le monde (L.Mons, 2005). On peut aller plus loin en utilisant la vapeur obtenue à la sortie de la turbine à vapeur soit comme source de chaleur industrielle, soit pour l'alimentation des réseaux de chauffage collectif. C'est ce que l'on appelle la cogénération de chaleur et d'électricité. Le rendement global atteint alors 85% (J.L.Bobin, H.Nifenecker, C.Stéphan, 2001). Aujourd'hui, seulement le tiers de l'approvisionnement énergétique des réseaux de chaleur collectifs en France provient de la cogénération. Le développement de cette filière à cycle combiné et à cogénération permettrait de renforcer l'utilisation du gaz, ressource fossile la moins émettrice de CO₂. Ce développement pourrait s'accélérer à l'avenir avec la miniaturisation des turbines à gaz qui

permet d'envisager une implantation de celles-ci au plus près des besoins de chauffage (MIES, 2004). Par ailleurs, les performances de cette filière conduisent à deux remarques. D'une part, le principe de la cogénération devrait pouvoir être appliqué au nucléaire lorsque celui-ci atteindra les hautes températures (cf. partie consacrée à la filière électronucléaire). D'autre part, devant l'intérêt du cycle combiné, il paraît souhaitable de promouvoir la mise au point de centrales fonctionnant au charbon gazéifié, celles-ci répondent par ailleurs à l'objectif de séquestration du CO₂ (cf. partie concernant la capture du CO₂).

Deuxième levier technologique : développer les filières énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone

Répondre à la croissance des besoins énergétiques mondiaux tout en favorisant le recul du recours aux énergies fossiles suppose de développer massivement la production d'énergies faiblement émettrices de CO₂ : énergies renouvelables et énergie nucléaire.



Source : Parlement,

Suivant les types de filières considérées, les facteurs à prendre en compte pour assurer leur essor ne sont pas les mêmes. En matière de production d'électricité, le potentiel actuel des énergies renouvelables paraît bien en deçà de celui de l'énergie nucléaire, laquelle, en revanche, ne pourra véritablement accroître sa contribution (déjà élevée) à l'ensemble de la production française d'électricité. De plus, l'essor significatif des filières de production d'électricité à faibles émissions de CO₂ suppose que l'évolution des usages soit également au rendez-vous. Le développement des technologies fonctionnant à l'électricité constitue donc une voie parallèle indispensable : les réseaux de transports fonctionnant à l'électricité par exemple. La production de chaleur constitue quant à elle un domaine où les applications des énergies renouvelables sont les plus performantes dans la mesure où la technologie est au point et implique des situations de production décentralisée, donc au plus près des besoins. Un constat similaire peut être dressé en matière de carburant, les filières de production de biocarburants arrivant elles aussi à maturité.

Au total, les filières décrites ci-après ne sont pas toutes au point, certaines nécessitant des recherches amont ou des investissements d'infrastructures de grande ampleur qui repoussent le moment de leur disponibilité : production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque ; voiture électrique ; réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération ; pile à combustible ; réacteur nucléaire de fusion ; géothermie profonde ; production, transport et stockage de l'hydrogène. A court terme, les technologies à développer sont les suivantes (Ministère délégué à la recherche, 2004) : production de biocarburants ; chauffage issu de

l'énergie solaire, géothermique et/ou de la biomasse ; production d'électricité à partir de l'énergie éolienne.

Le secteur des transports : développer les alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion

Secteur d'activité le plus émetteur de CO₂, le secteur des transports est aussi celui au sein duquel se posent les plus grandes difficultés de substitution de nouvelles énergies aux combustibles fossiles. Pour autant, plusieurs voies, plus ou moins avancées, existent pour constituer une offre de carburants et/ou de motorisation alternatives.

⇒ *Les carburants moins carbonés issus de combustibles fossiles*

Aujourd'hui, deux formes de carburants gazeux issus du pétrole ou du gaz naturel sont disponibles sur le marché : le Gaz Naturel pour Véhicules (GNV) et le Gaz de pétrole Liquéfié (GPL).

Pour ce qui concerne le GPL, son intérêt en matière d'émissions de CO₂ s'est peu à peu estompé compte tenu des progrès de la dépollution des émissions issues des carburants classiques, du manque d'investissement des constructeurs dans l'optimisation des motorisations et de l'absence de voitures mono-carburant. En France, après avoir connu un essor important à partir de 1995, le GPL connaît un déclin depuis 2000 à la suite de plusieurs accidents (explosion de réservoirs de véhicules). On observe ainsi un reflux des ventes de voitures neuves en bicarburant et simultanément celle du nombre des points de vente, tandis que la production de GPL carburant est passée de 250 000 à 150 000 tonnes entre 2000 et 2004. Aujourd'hui, seulement 180 000 véhicules

roulent au GPL en France, grâce à l'approvisionnement de 2 000 stations services.

En raison d'un bilan CO2 plus favorable, la filière GNV semble avoir en revanche le vent en poupe à l'heure actuelle. Outre l'objectif d'une contribution de 20% à la consommation énergétique des transports en 2020 fixé par la Commission européenne, la filière GNV fait l'objet d'une attention croissante en France où elle n'émerge véritablement qu'en 1998 à la suite d'un premier accord (incitation fiscale sur le carburant, aide financière à l'achat d'un véhicule GNV...) entre les pouvoirs publics et les acteurs concernés (IFP, 2006). Après un second protocole portant sur la période 1999-2005, le parc GNV compte 1 600 autobus et 300 véhicules de service urbains (bennes à ordures notamment) et 5 500 véhicules légers et véhicules utilitaires légers (Parlement, 2005). Signé le 4 juillet 2005, un troisième protocole entre l'État et la filière GNV fixe de nouveaux objectifs à l'horizon 2010 : un parc total de 100 000 véhicules ; doublement du parc de bus au GNV et quadruplement du celui de véhicules lourds ; multiplication des stations services pour développer le marché des véhicules individuels... Au total, la contribution du GNV à l'objectif de réduction des émissions de CO2 devrait rester modeste en raison du faible nombre de modèles de véhicules proposés et de stations services (300 stations GNV en 2010 contre 2 000 stations GPL actuellement), et de la faible rentabilité d'une filière qui ne propose pas d'alternative véritable aux filières automobile classique (Parlement, 2005).

⇒ *Les biocarburants*

La production des biocarburants sollicite une énergie renouvelable, la biomasse. Celle-ci désigne la masse totale de l'ensemble des êtres vivants sur

terre, considérée du point de vue de l'énergie que l'on peut en obtenir. Plus précisément, les biocarburants sont produits à partir de cultures dédiées à leur fabrication. Actuellement, deux grandes catégories de biocarburants sont mises en œuvre, l'une destinée aux moteurs essence et l'autre aux moteurs diesel (Parlement, 2006 et 2005) :

- L'éthanol : biocarburant le plus produit et le plus utilisé dans le monde, il est issu de la fermentation de sucres (betteraves, cannes à sucre) ou d'amidon (amylacées : blé, maïs) puis de la distillation pour séparer l'alcool de l'eau. Il peut être utilisé par incorporation directe dans l'essence, avec un taux de substitution qui peut atteindre 85%¹, sous réserve d'une adaptation des carburateurs et des moteurs². L'éthanol peut aussi être employé sous forme d'ETBE (éthyl tertio butyl éther), composé oxygéné issu de la réaction en quantités presque égales d'éthanol et d'isobutène, co-produit d'origine pétrolière. Ce deuxième produit a la préférence des pétroliers dans la mesure où il a l'avantage de parfaitement se mélanger à l'essence, de pouvoir y être incorporé à tout moment et d'être transporté avec elle sans précaution particulière.
- L'ester méthylique d'huiles végétales (EMHV) : produits à partir d'huiles végétales (de colza, de tournesol, de soja...), l'EMHV est

¹ Dans l'Union européenne, cette utilisation directe au-delà de 10% d'incorporation est car elle augmente la volatilité du produit

² L'éthanol peut être utilisé à des niveaux très élevés par les automobiles dans le cadre de véhicules dits « fuel flexible ». Grâce à un calculateur qui adapte la combustion au mélange et à des modifications du moteur, ces véhicules acceptent indifféremment de 0 à 85% d'éthanol (E 85).

incorporé au gazole. Cette incorporation est autorisée en France jusqu'à 30% pour les flottes captives et jusqu'à 100% en Allemagne avec des précautions particulières.

L'intérêt des biocarburants en matière environnementale réside dans le fait que les émissions de CO₂ issues de la combustion de la biomasse s'équilibrent avec l'absorption par photosynthèse réalisée par la plante durant sa croissance¹. Cet apport est cependant nettement réduit par la dépense d'énergie que nécessite le processus de transformation de la biomasse en carburant : les réductions d'émissions seraient de 60% pour l'éthanol et de 70% pour l'EMHV (Parlement, 2005). Les autres avantages des biocarburants résident dans le fait qu'ils se substituent partiellement à une ressource en voie de raréfaction et peuvent s'insérer sans trop de problèmes dans les circuits de production et de distribution de carburants (Parlement, 2006).

Le pouvoir calorifique des biocarburants est en revanche inférieur à celui des hydrocarbures : avec le même volume de carburant, un automobiliste pourra faire d'autant moins de kilomètres que le volume d'incorporation de biocarburants sera important (Parlement, 2005). Ainsi, 1,063 litre d'EMHV et 1,5 litre d'éthanol sont nécessaires pour produire la même énergie qu'un litre de gazole ou d'essence. Ces différences ne sont cependant

¹ Toutefois, lorsque l'on raisonne à partir de la ressource forestière, on constate que le nouvel arbre n'est pas en mesure d'absorber immédiatement le CO₂ rejeté par la combustion de son aîné dans la mesure où il faut compter une trentaine d'années pour qu'il parvienne à maturité ; dès lors, un équilibre strict suppose un volume de plantation supérieur à l'abattage (J.C.Lhomme, 2001). On peut également estimer sur ce plan qu'il y a une anticipation de la restitution du CO₂ qui aurait, de toute façon, été réémis dans l'atmosphère du fait de la décomposition des arbres (Parlement, 2006).

sensibles qu'à partir de 25% d'incorporation (Minefi, 2005). Une autre limite renvoie au fait que, en l'état actuel des méthodes de production, les seuils économiques de rentabilité de la filière sont encore loin d'être atteints puisqu'ils se situent à 75\$-80\$ le baril pour les esters et entre 90\$ et 150\$ le baril pour l'éthanol, en incorporant à ce prix le coût des « bases essence » incorporées pour produire de l'ETBE.

A l'échelle mondiale, les Etats-Unis et le Brésil ont été les pionniers du renouveau de la production d'éthanol carburant – à partir du maïs pour les États-Unis et de la canne à sucre pour le Brésil – à la suite des chocs pétroliers des années 1970 (Parlement, 2005). Du fait de cette antériorité considérable par rapport à l'Europe, ces deux pays sont de loin les principaux producteurs d'éthanol à l'heure actuelle², s'appuyant notamment sur leur important marché intérieur. La situation est différente pour ce qui concerne l'EMHV dans la mesure où la motorisation diesel domine avec 60% de la consommation de carburant en Europe. L'Europe est très logiquement leader mondial sur le marché de l'EMHV dont elle assure 83% de la production³.

En 2003, le développement des biocarburants en Europe a fait l'objet d'une directive de l'Union Européenne fixant comme objectif leur incorporation à hauteur de 5,75% dans les carburants automobiles en 2010. Le Gouvernement français a décidé, le 1^{er} septembre 2005, d'atteindre dès 2008 cet objectif et de porter le taux d'incorporation à 7% en 2010 et à 10% en 2015. On est cependant

² La production d'éthanol se répartit de la manière suivante : Brésil 62 %, États-Unis 43 %, reste du monde 5 %.

³ 44% pour l'Allemagne, 22% pour la France, 17% pour l'Italie.

encore loin de la cible dans la mesure où, en 2005, seulement 500 000 tonnes de biocarburants (400 000 tonnes de biodiesel et 100 000 tonnes d'éthanol) ont été incorporées aux 40 millions de tonnes de carburants consommés dans les transports en France, soit l'équivalent 1% environ de l'ensemble de la consommation de carburant (Wikipedia, 2006).

En France, le développement de la filière des biocarburants passe aujourd'hui par la résolution du problème de la concurrence d'occupation des sols entre les usages agricoles et les usages non agricoles (dont les biocarburants, mais également la chimie verte). L'objectif d'incorporation des biocarburants à hauteur de 5,75% suppose en effet de cultiver 220 000 ha pour l'éthanol et 1 800 000 ha pour l'EMHV, soit 20% de la production de Betterave, 3% de la production de blé et 75% de la production d'oléagineux. Il s'agit d'aller bien au-delà de la seule utilisation des jachères qui représentent aujourd'hui 1 200 000 ha (Minefi, 2005). Au delà, la substitution complète des carburants fossiles par les biocarburants paraît illusoire : P.Radanne (2005) souligne que si la France consacrait un quart de sa surface agricole utile¹ – laquelle est estimée à près de 30 millions d'hectares en 2004 (Ministère de l'écologie, 2006) – à la production de biocarburants, elle n'assurerait qu'un tiers des besoins actuels de carburants.

Plusieurs observateurs estiment que l'amélioration à venir des performances (quantités, coûts,

¹ La surface agricole utile (SAU) est un concept statistique destiné à évaluer le territoire consacré à la production agricole. La SAU est composée de : terres arables (grande culture, cultures maraîchères, prairies artificielles...), surfaces toujours en herbe (prairies permanentes, alpages), cultures pérennes (vignes, vergers...). Elle n'inclut pas les bois et forêts mais comprend les surfaces en jachère (comprises dans les terres arables).

réduction des émissions de CO₂) de la filière biocarburant passe par la mise au point de processus permettant d'utiliser l'ensemble de la plante au lieu de n'exploiter que la graine ou la racine comme actuellement. Ces procédés sont regroupés sous la dénomination anglo-saxonne de « biomass to liquid » (BTL). Deux voies sont aujourd'hui explorées (Ministère délégué à la recherche, 2005) :

- la voie thermo-chimique (ou voie sèche) : production de gaz de synthèse (CO+H₂) par gazéification de la biomasse ligno-cellulosique (bois, déchets de bois, paille,...). Cette première étape, qui arrivera à maturité industrielle vers 2015, peut être suivie au choix : de la production de carburants liquides directement substituables (gazole) par le procédé Fischer-Tropsch ; ou de la production d'hydrogène par le procédé de gaz-shift.
- la voie biochimique (ou voie humide) : production d'éthanol à partir de matières premières ligno-cellulosiques par le biais de procédés biochimiques (hydrolyse par des enzymes cellulolytiques et fermentation éthanolique par des souches de levures utilisant les pentoses) qui devrait arriver à maturité industrielle vers 2010.

⇒ *La voiture électrique : une voie prometteuse*

Reposant sur des principes établis dès le 19^{ème} siècle (batterie et générateur électriques), la voiture électrique représente une voie éminemment prometteuse en terme d'émissions de CO₂ puisque son utilisation en serait dépourvue ; à la condition toutefois que l'électricité injectée dans les batteries soit produite par les filières nucléaires, renouvelables ou thermiques à séquestration de

CO2. Outre l'absence d'émissions de CO2, l'utilisation du véhicule électrique présente l'intérêt de générer de faibles coûts comparativement à celle des véhicules à moteur conventionnels : grâce au rendement énergétique élevé du moteur électrique (x 2 ou x 3 par rapport à celui du moteur thermique), la simple recharge sur secteur ferait ressortir un coût d'un euro les 100 km, d'un ordre de grandeur 10 fois inférieur au coût des carburants classiques à la pompe, en raison notamment du fait que l'électricité n'est pas soumise à la TIPP. Le moteur électrique constitue par ailleurs une technologie particulièrement fiable et silencieuse (Parlement, 2005).

Ces promesses n'ont trouvé pas jusqu'ici de débouché commercial. Deux raisons principales peuvent l'expliquer. La première est l'immaturité de la technologie. Que ce soit au tout début de l'aventure automobile ou au début des années 1990, les performances des voitures électriques s'avèrent trop faibles et leur coût trop élevé pour qu'elles apparaissent comme des concurrentes sérieuses. La seconde est la quasi-absence de marché pour les voitures mono usage. En effet, l'autonomie des véhicules électriques est jusqu'à présent restée en deçà des 100 km, de telle sorte que la voiture électrique ne peut être qu'urbaine, répondant à la majeure partie des besoins quotidiens mais ne pouvant prendre en charge les déplacements de week-ends et les départs en vacances. En dehors d'un statut de « second » véhicule d'un foyer, la capacité de pénétration sur le marché de la voiture électrique demeure réduite (Parlement, 2005).

Des avancées techniques importantes dans plusieurs domaines seront nécessaires pour retourner la situation (Parlement, 2006) :

- L'autonomie : Les prototypes pré-industriels disponibles sur le marché commencent à atteindre une autonomie proche de 200 km, sans que soient réellement précisées les vitesses moyennes liées à ce degré d'autonomie.

- Les temps de recharge : Les bornes de recharge actuelle, qu'elle soient domestiques¹ ou publiques, permettent de répondre au cycle d'utilisation urbain quotidien par une recharge nocturne. Mais, pour une utilisation journalière impliquant un kilométrage plus élevé, la longueur du temps de charge implique que d'autres solutions soient envisagées, comme l'échange standard de batteries qui suppose une technologie adaptée (il s'agit de manipuler 200 à 400 kg) et un déploiement de réseaux de distribution.

- La fiabilité à long terme : Elle dépend de la résistance des batteries aux cycles charge/recharge pour des utilisations moyennes de véhicules de l'ordre de 12 500 km par an et pour un parc où 50% des véhicules ont au moins plus de dix ans.

Toutefois, plusieurs observateurs estiment que la filière tout électrique et la filière hybride pourrait trouver un horizon commun (Parlement, 2005). Le principe d'un véhicule offrant la possibilité de rouler exclusivement à l'électricité dans le cadre des déplacements urbains quotidiens tout en permettant de recourir à la motorisation thermique classique sur de plus grandes distances constitue une perspective hautement prometteuse. 60% des trajets journaliers seraient couverts par un véhicule

¹ Les véhicules électriques se rechargent normalement dans des lieux privés à partir d'une prise de 16 A protégée par un disjoncteur différentiel de 30 mA, identique à celui d'une salle de bains (Parlement, 2005).

hybride rechargeable (VHR) disposant d'une autonomie électrique de 30 km et 70% avec une autonomie de 40km. EDF a mené des études pour évaluer les émissions de CO₂ du moteur à la roue d'un véhicule familial moyen essence. Ce véhicule émet normalement 155g de CO₂/km. S'il s'agit d'un hybride de type Prius environ 100g, s'il s'agit d'un VHR ayant une autonomie comprise entre 10 et 60 km, il émettrait en France entre 80 et 40g de CO₂/km. Ainsi le VHR permettrait d'atteindre l'objectif du facteur 4 dans le secteur automobile.

⇒ *La voiture à pile à combustible hydrogène : mythe et réalité*

Depuis plus d'une décennie, l'économie de l'hydrogène est identifiée comme une des solutions de substitution à l'économie pétrolière qui a porté le développement de la planète depuis plus d'un siècle. Dans le cadre d'une stratégie de réduction des émissions de CO₂ du secteur des transports, le principal avantage de l'hydrogène réside dans le fait que celui-ci ne comprend aucune molécule de carbone (J.Rifkin, 2002). Le recours à l'hydrogène entraîne par ailleurs une nouvelle approche des ressources énergétiques primaires puisque celui-ci ne discrimine plus les territoires. L'hydrogène est l'élément le plus universellement répandu puisqu'il représente : 75% de la masse de l'univers et 90% des molécules qui le composent ; 30% de la masse du Soleil ; 70% de la surface terrestre.

L'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans le secteur des transports repose sur le recours aux piles à combustible. Celles-ci consistent à produire de l'électricité à partir de la réaction inverse de l'électrolyse de l'eau (séparation des molécules d'hydrogène et d'oxygène en faisant passer un courant électrique dans l'eau). Dans une pile à combustible, dont le procédé a été découvert en

1839 par l'anglais William Grove, l'hydrogène est introduit au niveau de l'anode et y est décomposé en protons et en électrons par un catalyseur ; les protons transitent de l'anode vers la cathode où ils se combinent à l'oxygène de l'air pour donner de l'eau ; les électrons rejoignent la cathode en transitant par un circuit externe, lequel récupère l'énergie électrique ainsi produite. C'est Francis Bacon qui réalise la première véritable pile à combustible hydrogène-oxygène vers 1935, qui aboutira en 1953 à la fabrication d'un premier générateur de 1 kW électrique. Cette réalisation mit en évidence les différents avantages de cette pile : fonctionnement silencieux (pas de pièces mobiles), rendement très élevé (conversion de l'énergie du combustible en travail jusqu'à un taux de 60% contre 30% environ pour les moteurs à combustion interne), possibilité d'utilisation en stationnaire ou en traction (Parlement, 2005). Il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier pour que les recherches concernant les applications à l'automobile des piles à combustible prennent leur véritable essor (Parlement, 2001). Toutefois, au début des années 1980, le constat sera fait des profondes incertitudes qui caractérisent cette filière, de nombreux verrous technologiques restant à être levés malgré plusieurs années de recherche. Ce n'est qu'à partir des années 1990 que le « mythe » de l'économie de l'hydrogène réapparaît.

Toutefois, le développement de la filière présente encore aujourd'hui plusieurs limites de taille (Parlement, 2005). Tout d'abord, les progrès sur les batteries électriques confèreraient aux véhicules électriques ou hybrides « classiques » un avantage décisif par rapport aux véhicules fonctionnant à l'hydrogène. Deux autres limites concernent la mise au point de la pile à combustible. En l'état actuel de

la technologie, seul le platine est véritablement efficace pour la constitution du catalyseur. Or on extrait seulement 200 à 300 tonnes de ce métal par an dans le monde. Le nombre théorique de piles à combustible que l'on peut construire paraît donc très limité. Il faut donc réussir soit à en diminuer très fortement les quantités (division par 10), soit à trouver un autre matériau. Par ailleurs, La membrane joue le rôle essentiel d'électrolyte, c'est à dire de substance permettant la dissociation, en présence d'eau, d'un élément en ions chargés négativement et positivement. Elle doit en même temps être conductrice tout en étant très stable chimiquement, très fine et très solide. La membrane pose ainsi de nombreuses difficultés en raison de l'insuffisance des performances du matériau actuellement utilisé, le Nafion.

Une autre catégorie de limites concerne le carburant, l'hydrogène. Celui-ci n'existe pas à l'état isolé dans la nature : présent dans l'eau, dans les combustibles fossiles et dans tous les êtres vivants, il a besoin d'être dissocié. Or, force est de constater que la seule méthode de production vertueuse sur le plan des émissions de gaz à effet de serre – l'électrolyse de l'eau – est aujourd'hui très peu développée à l'échelle mondiale, en raison de coûts particulièrement élevés. Fortement polluante, la production d'hydrogène par transformation de combustibles fossiles – qui est à l'origine de 96% de l'hydrogène consommé chaque année dans le monde – génère elle-aussi à des coûts prohibitifs puisque équivalents à 120\$ le baril de pétrole. Deuxièmement, l'application de l'hydrogène à l'automobile accentue le problème du stockage évoqué plus loin pour la question de la conversion de l'électricité en hydrogène : trois kg d'hydrogène comprimé à 200 bars permettent d'assurer une

autonomie de 300 km mais exigent un réservoir de 200 kg d'un volume encore important ; si la liquéfaction permet véritablement de stocker l'hydrogène dans des volumes plus compatibles avec une utilisation automobile, elle présente l'inconvénient de réduire de près d'un tiers le pouvoir calorifique de l'hydrogène. De plus, la distribution de l'hydrogène suppose des investissements d'infrastructures considérables si l'on souhaite que celle-ci soit aussi diffuse que celle des produits pétroliers.

Le secteur des transports : développer les réseaux de transports électriques

La promotion des modes de transports les plus économiques en matière de consommation d'énergie (cf. point sur le développement des modes de transports alternatifs à la route) peuvent correspondre à la promotion de modes reposant sur l'absence de recours à une énergie mécanique : vélo et marche à pieds dans le cas des déplacements de personnes. Plus fréquemment, il s'agit de promouvoir des modes de transports qui sont par ailleurs faiblement émetteurs de CO2 dans la mesure où ils fonctionnent grâce à l'électricité : train, métro, tramway, trolleybus. Autrement dit, les stratégies de développement des modes de transports les plus efficaces convergent avec celles concernant le développement de filières de production d'électricité « propres » : nucléaires, renouvelables.

Le secteur résidentiel et des services : développer la production de chaleur issue des énergies renouvelables

Le chauffage des locaux et de l'eau sanitaire représentent 95% de l'énergie consommée par le

secteur « résidentiel et services » (Parlement, 2006). Spontanément, il paraît logique de vouloir privilégier la croissance massive du recours à l'électricité pour le chauffage des locaux. Mais cela aurait pour conséquence de multiplier par quatre la production d'électricité en 2050, et de créer d'importants pics de consommation qui, en l'état des technologies, ne peuvent être assurés que par des centrales fonctionnant à l'aide de combustibles fossiles, celles-ci étant les plus flexibles (Parlement, 2006).

Aussi, la voie la plus vertueuse est bien celle de la production de chaleur par des dispositifs individuels et collectifs fonctionnant à l'aide des énergies renouvelables.

⇒ *L'énergie de la biomasse*

L'utilisation de la biomasse pour la production de chaleur renvoie à la combustion de produits et déchets forestiers et agricoles (bois, résidus de scieries, pailles...), de déchets d'élevage (sous-produits animaux, lisiers de porcs, déjections bovines, fientes de volaille, farines animales...), de la fraction biodégradable (ou part fermentescible) des déchets industriels banals et déchets ménagers (c'est-à-dire biodéchets, déchets verts...). Suivant les cas, cette production de chaleur s'effectue directement chez le particulier ou dans le cadre de réseau de chauffage collectif.

Selon les estimations, entre le tiers et la moitié de l'accroissement annuel de la biomasse agricole et forestière n'est pas valorisé actuellement en France. En effet, la forêt française produit une biomasse de 90 millions de mètres cubes de bois par an, alors que la récolte annuelle oscille seulement entre 45 millions et 60 millions de mètres cubes. Autrement dit, la forêt française est loin d'être menacée à court terme par la déforestation

puisque la croissance annuelle du bois n'est même pas exploitée à l'heure actuelle. Le développement de l'exploitation forestière à des fins énergétiques ne doit cependant pas porter atteinte à la filière bois traditionnelle ; cette dernière crée par m³ de bois trois fois plus de valeur ajoutée et d'emplois que la filière énergie et permet le stockage du CO₂ puisqu'elle maintient la ressource en place pendant vingt ans en moyenne. Au-delà, quand auront été valorisés les déchets de l'agroforesterie et les sous-produits de l'industrie du bois, ressources les plus accessibles et les moins coûteuses, il s'agira d'exploiter des cultures énergétiques agricoles et forestières ou cultures ligno-cellulosiques, tout en préservant cependant la production de cultures alimentaires. Pourront être privilégiées les cultures dédiées à courte rotation, c'est-à-dire à croissance rapide (Sénat, 2006).

De façon connexe, P.Radanne (2005) souligne qu'un effort doit également être réalisé pour améliorer les performances des appareils de chauffage eux-mêmes : les poêles à bois et les cheminées traditionnels ont des rendements médiocres (35%). Les progrès dans la conception pourraient porter sur : la composition des alliages, le dessin des échangeurs, la gestion de l'entrée d'air...

Il faut rappeler que si l'utilisation de la biomasse produit du CO₂, ces émissions s'équilibrent avec l'absorption que réalisent par photosynthèse les plantations effectuées pour compenser les prélèvements. On peut également estimer sur ce plan qu'il y a une anticipation de la restitution du CO₂ qui aurait, de toute façon, été réémis dans l'atmosphère du fait de la décomposition des arbres (Parlement, 2006).

Au delà, c'est l'ensemble des déchets ménagers et industriels banals qui peut être valorisé sous forme de chaleur au moment de leur incinération ; Il importe de souligner qu'avec les règles imposées par l'arrêté du 20 septembre 2002, la pollution de l'air par l'incinération des déchets ménagers est aujourd'hui extrêmement limitée. A l'heure actuelle, on estime que 2,4 millions d'habitants pourraient théoriquement être chauffés à partir de la chaleur produite par les incinérateurs (Sénat, 2006).

⇒ *L'énergie géothermique*

La géothermie est l'énergie constituée par la chaleur interne de la terre qui provient non seulement du refroidissement progressif du noyau, dont la température est d'environ 5000°C, mais aussi et surtout de la désintégration naturelle d'éléments radioactifs contenus par le manteau (Parlement, 2006). La géothermie est la source d'énergie renouvelable offrant les flux énergétiques les plus constants – c'est à dire non dépendants de conditions naturelles ou climatiques contingentes – donc permettant des fonctionnements en base, comme l'énergie nucléaire (Ministère délégué à la recherche, 2004). En revanche, son utilisation dépend de la profondeur à laquelle on descend la puiser : selon le gradient géothermique, la température du sol augmente, en effet, de 3 degrés tous les 100 mètres en moyenne. Ainsi, pour le chauffage de logements et de bureaux, la géothermie superficielle est suffisante : la chaleur (de l'ordre de 30°C) est récupérée à une faible profondeur (quelques mètres) par capteurs enterrés horizontaux ou verticaux (si la surface au sol disponible est faible) et remontée par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur, pour alimenter des radiateurs, des planchers chauffants... Ce dispositif géothermique permet également d'exploiter le

différentiel de chaleur pouvant exister l'été entre les sols et l'air, pour rafraîchir l'intérieur des bâtiments. Si l'on souhaite alimenter un réseau de chauffage urbain, il est cependant nécessaire d'aller puiser la chaleur plus en profondeur.

La géothermie basse température a été développée en France au plus fort des chocs pétroliers dans les années 1980, pour contribuer au chauffage des bâtiments publics et des logements sociaux notamment dans le Bassin Parisien. Mais la chute des prix du pétrole et du gaz après 1985 a bloqué son extension. Aujourd'hui, sur la cinquantaine d'installations construites à cette période, les 2/3 sont encore en activité aujourd'hui.

⇒ *L'énergie solaire*

La chaleur produite par le rayonnement solaire peut servir à produire de l'eau chaude sanitaire pour les usages domestiques (cuisine, douche...) L'installation est des plus simple : des panneaux de couleur sombre placés sur le toit du bâtiment permettent de chauffer un fluide caloporteur (composé le plus souvent d'eau et d'antigel) qui va ensuite transmettre ses calories au ballon d'eau traditionnel. A partir d'une certaine taille, les capteurs thermiques peuvent également contribuer au chauffage des locaux. Le fluide caloporteur circule alors dans des canalisations passant dans le sol des locaux. A terme, est envisagée la mise en œuvre du concept de « cogénération solaire » : la récupération de chaleur derrière un panneau photovoltaïque permettrait simultanément de chauffer un fluide et de produire de l'électricité (M.H. Laurent et N.Recosio, 2007).

Alors que l'énergie solaire permet d'économiser annuellement 35% sur le chauffage et 50% sur l'eau chaude, notre pays accuse un retard assez net par rapport à certains de ses voisins européens

pourtant moins ensoleillés : ainsi, la France ne compte que 150 000 mètres carrés de capteurs installés, contre 2 millions de mètres carrés en Allemagne. De même, l'Espagne a décidé, en mars 2006, de rendre obligatoire le solaire thermique pour l'eau chaude sanitaire dans les bâtiments neufs et les rénovations, alors que notre pays s'est refusé à inscrire une telle mesure dans la loi énergie promulguée le 13 juillet 2005. Pourtant, la même loi affirme l'objectif de parvenir 200 000 chauffe-eau solaires en 2010, soit environ un million de m² de (Sénat, 2006).

Le secteur de la production d'électricité : renouveler la filière nucléaire pour maintenir sa contribution au « mix énergétique » français

L'énergie nucléaire paraît constituer un élément incontournable d'une stratégie de production d'électricité faiblement émettrices de CO₂ (B.Wiesenfeld, 2005). En effet dans son cycle construction/fonctionnement, l'énergie nucléaire produit de l'électricité en émettant 100 fois moins de gaz à effet de serre que le charbon ou le pétrole (Parlement, 2006). Par ailleurs, elle reste une énergie incomparablement concentrée puisque 1g de matière fissile permet de produire 24 000 KWh, soit l'équivalent de 2 tonnes de pétrole. Enfin, la filière nucléaire permet une production d'électricité à des prix stables, indépendants des variations de prix des hydrocarbures, dans la mesure où le coût du combustible ne représente que 15% du coût total du kWh nucléaire (F.Carré et J.C.Petit, 2006). Ainsi, les différents rapports sur l'avenir énergétique de la France rédigés ces dernières années montrent très clairement qu'à l'horizon 2050, seuls les scénarios s'appuyant la production électronucléaire

permettent de satisfaire la demande tout en respectant les critères de Kyoto (Parlement, 2006).

⇒ Alors que sa contribution à la production d'électricité française est déjà maximale, la filière nucléaire n'a pas encore résolu la question de son acceptation sociale

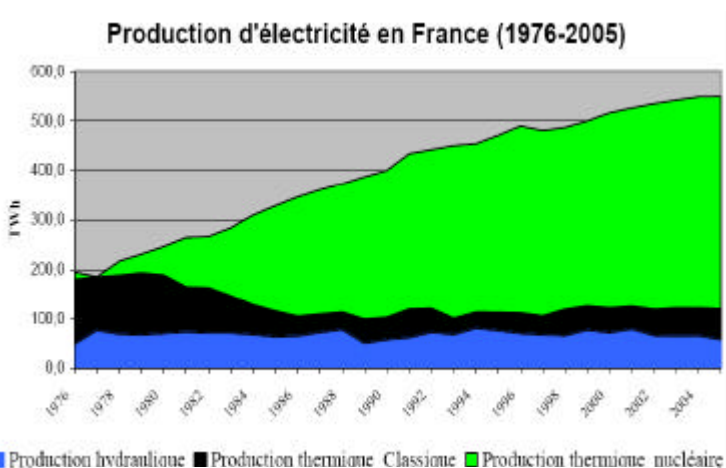
Toutefois, la filière nucléaire ne pourra guère contribuer à l'objectif d'une division par quatre des émissions de CO₂ d'ici 2050 affirmé par la France en 2005. D'une part, l'électricité ne représente que 23% de la consommation énergétique finale de la France en 2005 (Minefi, 2006). D'autre part, le poids de la filière nucléaire dans la production totale d'électricité de la France est d'ores et déjà proche de son maximum avec 78,5% en 2005. Autrement dit, à moins que l'électricité prenne une part croissante dans les usages énergétiques finaux, notamment dans les transports, l'énergie nucléaire ne pourra progresser davantage dans le « mix énergétique » de la France.

Dans ce cadre, le principal enjeu qui se pose pour la filière nucléaire est celle du maintien de sa contribution aux besoins de la France en matière d'électricité. Cette problématique renvoie à la question centrale de l'acceptation sociale de ce mode de production d'électricité : la durée de vie des déchets et l'accident de Tchernobyl continuent d'alimenter une certaine inquiétude dans l'opinion publique ; en janvier 2006, 42% des personnes interrogées par le Credoc estimaient que l'énergie nucléaire présentait plus d'inconvénients que d'avantages (Minefi, 2006). Dès lors, les investissements futurs dans la filière nucléaire doivent apporter de nouvelles réponses à cette problématique de gestion des déchets et des risques nucléaires.

Il se trouve que la question de la stratégie de renouvellement du parc français actuel se pose dès maintenant, même si celui-ci possède la moyenne d'âge (17 ans et 6 mois en 2003) la plus jeune de tous les parcs des grands pays nucléaires (Parlement, 2003). En effet, les réacteurs les plus anciens du parc français actuel – couplés au réseau entre 1977 et 1994 – arriveront à la fin de leur durée de vie théorique à partir de 2007 (30 ans). En même temps, il paraît aujourd'hui possible de prolonger leur carrière jusqu'à 40 ou 60 ans avec le remplacement de certains composants sensibles¹. Ce scénario d'une «cure de jouvence» du parc existant n'est cependant pas sans risques pour l'équilibre économique de l'exploitation de certains réacteurs, dans la mesure où le remplacement de composants est très coûteux. Il n'est pas sans risque non plus pour le maintien dans le temps de la puissance de production : parce que le parc nucléaire présente une grande homogénéité

technique (il est composé quasi exclusivement de réacteurs de 2^{ème} génération à eau sous pression REP), la découverte d'une faille technique dans un réacteur entravant le prolongement de son exploitation pourrait remettre en cause la durée de vie de l'ensemble du parc et entraîner des arrêts « en cascade » puisque les réacteurs ont été construits sur une période de temps resserrée (Parlement, 2003).

Dès lors, faut-il engager le renouvellement du parc dès 2020 par une nouvelle génération de réacteur à eau pressurisée (EPR) dits « évolutionnaires » ? Si cette hypothèse n'apporte pas de réponse définitive à la question des déchets et des risques – les réacteurs de 3^{ème} génération ne constituent qu'une amélioration de la conception des réacteurs actuels sans rupture technologique – elle permet de ne pas élever à un niveau préoccupant la durée de vie moyenne du parc nucléaire français en lissant son renouvellement. Faut-il au contraire attendre la mise au point des réacteurs révolutionnaires de 4^{ème} génération et investir massivement dans les énergies renouvelables dans l'intervalle ? Cette option permet de rentabiliser au maximum le parc actuel avec les risques que cela comporte, de provoquer une véritable rupture technologique susceptible de renforcer l'acceptation sociale de la filière nucléaire, de promouvoir les filières renouvelables, de consacrer des financements plus importants au développement de ces deux derniers types de filières. Telle peut être interprétée l'alternative nucléaire selon le Parlement (2003) et P.Radanne (2005).



¹ L'évolution de la durée de vie des réacteurs nucléaires dépend de considérations en matière de sûreté (respect de la réglementation en vigueur), de rentabilité (valorisation du capital investi), de performance (maintien du rendement de la production électronucléaire). En dernier ressort, c'est cependant la dégradation des composants non remplaçables (cuve du réacteur, enceinte de confinement) au-delà d'une limite définie par des considérations de sûreté qui engage ou non la décision de l'arrêt de l'installation considérée (Parlement, 2003).

² 13 réacteurs sur 58 du parc électronucléaire d'EDF vont atteindre 40 années de fonctionnement avant 2020. Puis 24 réacteurs supplémentaires atteindront cette barre avant 2025 (Parlement, 2003).

⇒ *La question des déchets et des risques nucléaires aujourd'hui*

Les déchets nucléaires constituent la part des combustibles usés restant après la phase de retraitement. Suivant leur radioactivité et leur durée de vie¹, ces déchets sont classés en trois ensembles distincts (J.L.Bobin, H.Nifenecker, C.Stéphan, 2001 ; J.C.Laroche, 2006) :

- Les déchets de haute radioactivité à vie longue : ils incluent le plutonium et les actinides mineurs. Leur durée de vie peut aller jusqu'à 25 000 ans. Pour le moment, ils sont vitrifiés et entreposés de manière provisoire dans des puits bétonnés sur les sites de traitement des combustibles irradiés. ;
- Les déchets de moyenne activité contenant des émetteurs à vie longue : il s'agit des produits de fission à vie longue dont la durée de vie dépasse 1 000 ans. Ils sont actuellement entreposés en surface, mais dans des bâtiments aménagés à cet effet par la Cogema à La Hague et à Marcoule, par le CEA à Cadarache ;
- Les déchets à vie courte de faible et moyenne activité : leur durée de vie est de 300 ans environ. A l'heure actuelle, ils sont stockés en surface par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA) dans deux centres situés dans la Manche et dans l'Aube.

On notera que la part des déchets nucléaire dans l'ensemble des déchets industriels rejetés par la France (2,5 tonnes par habitant et par an) est très faible puisqu'elle ne représente qu'un kilogramme par habitant et par an. Surtout les déchets nucléaires les plus dangereux, ceux dits à haute

activité, ne représentent que 1% de ce kilogramme. En 2004, ces déchets à haute activité conditionnés (vitrifiés) représentaient un volume cumulé de 1 639 m³, soit l'équivalent d'un cube de moins de 12 mètres de côté, qui pourrait s'élever à plus de 3 500 m³ à l'horizon 2020-2025, horizon auquel, après avoir suffisamment refroidis, ils pourront faire l'objet d'un traitement définitif.

Du fait de leurs durées de vie parfois très longue, ces déchets posent un véritable problème de société. A côté de la question de l'amélioration de l'efficacité de la production nucléaire pour réduire l'ampleur des déchets finaux à traiter – question qui renvoie à la mise au point de nouvelles générations de réacteurs – se pose celle du traitement et du stockage proprement dit des déchets. Par la loi du 30 décembre 1991, le législateur s'est prononcé pour la conduite de recherche dans trois directions quant à la gestion spécifique des déchets de haute activité à vie longue (J.L.Bobin, H.Nifenecker, C.Stéphan, 2001 ; J.C.Laroche, 2006) :

- la réduction de la durée de nocivité des déchets par la séparation et la transmutation : la séparation doit permettre de récupérer, d'une part, les actinides mineurs dont la durée de vie est de plusieurs centaines de milliers d'années et, d'autre part, les produits de fission dont la durée de vie se compte plutôt en milliers d'années. Les produits de fission seraient stockés, tandis que les actinides mineurs seraient transformés en produits de fission par un bombardement neutronique réalisé au sein d'un réacteur nucléaire dédié à l'incinération des déchets nucléaire (en l'état actuel du parc nucléaire français, il faudrait un réacteur incinérateur pour quatre réacteurs de type

¹ Période nécessaire pour que leur niveau de radioactivité soit divisé par deux.

REP). Cette piste est actuellement étudiée par le CEA ;

- la réalisation de laboratoires souterrains d'études géologiques en vue de stockages réversibles et irréversibles : il s'agit de se servir de couches souterraines profondes constituées d'argile, de granite ou de sel comme sarcophage pour les produits radioactifs issus du retraitement ou même pour des combustibles irradiés non retraités. L'ANDRA expérimente un lieu de stockage de ce type sur le site de Bure, dans la Meuse, dans une formation argileuse.

- le conditionnement des déchets et leur entreposage de longue durée en surface : les entreposages de longue durée en surface ou sub-surface visent des périodes de fonctionnement de 100 à 300 ans. Ils viennent compléter les entreposages industriels actuels conçus pour une durée de fonctionnement d'une cinquantaine d'années. Cette piste est actuellement étudiée par le CEA.

La loi de 1991 avait prévu qu'avant le 30 décembre 2006, le Gouvernement présenterait un nouveau projet de loi pour tirer le bilan de ces recherches. Une nouvelle loi a donc été adoptée sur le sujet : il s'agit de la loi de programme n° 2006-739 du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Le contenu de cette loi s'appuie sur les différents rapports d'évaluation réalisés dans la perspective de ce rendez-vous parlementaire par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, la Commission nationale du débat public la Commission nationale d'évaluation (CNE), l'Autorité de sûreté nucléaire... Sur le plan technologique, le texte définit les engagements suivants :

- La consécration des enseignements des recherches conduites depuis 1991 : La loi formule les principes de références à respecter pour la gestion future des matières et déchets radioactifs : l'entreposage comme étape préalable, notamment dans la perspective d'opérations de traitement des combustibles et des déchets ; après l'entreposage, le stockage comme solution pérenne pour les déchets de moyenne et de haute activité à vie longue qui ne peuvent pas être stockés en surface ou en faible profondeur pour des raisons de sûreté nucléaire et de radioprotection (cette étape ultérieure devrait être opérationnelle à partir de 2020, elle devra être réversible afin de rendre possible le traitement ultérieur des déchets stockés) ; la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets grâce à la séparation/transmutation (cette étape devrait devenir une alternative réelle au stockage à partir de 2040).

- La définition de nouvelles perspectives pour les trois programmes de recherche engagés en 1991 : Pour celui concernant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue, un bilan sera dressé en 2012 entre les différentes filières de transmutation. En fonction des résultats qui seront obtenus dans le cadre de ce bilan, des prototypes d'installation pourraient être construits à partir de 2020 et une mise en service industrielle envisagée à l'horizon 2040. Pour le programme relatif aux possibilités de stockage des déchets en couche géologique profonde, la demande d'autorisation de stockage sera instruite en 2015 et la mise en exploitation du centre de stockage interviendra en 2025 (naturellement dans le cas

où l'instruction préalable serait favorable). Pour le programme portant sur l'étude de procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface, la loi prévoit, au plus tard en 2015, la création de nouvelles installations ou la modification des installations existantes.

Pour ce qui concerne la question des risques de dysfonctionnement, on observe que jusqu'à présent, la sûreté des réacteurs est assurée par des actions délibérées des opérateurs. Autrement dit, le maintien de chaque réacteur nucléaire dans un état stable dépend entièrement de la qualification, de la conscience professionnelle et de l'attention constante de ces derniers. Ce niveau d'exigence peut paraître en contradiction avec l'idée que « l'erreur est humaine ». Aussi, il semble souhaitable de passer à un nouveau stade de sûreté d'ensemble des installations nucléaires qui s'affranchirait complètement de ces actions volontaires en promouvant le recours exclusif aux dispositifs de sûreté passive. Cette dernière reposerait sur des processus physiques (gravité, convection, différences de pression par exemple) assurant spontanément que le réacteur ne pourrait, en aucun cas, se mettre dans un état dangereux (J.L.Bobin, H.Nifenecker, C.Stéphan, 2001).

⇒ *A partir de 2020 : l'EPR comme optimisation de la génération précédente*

Le renouvellement du parc français actuel de réacteur nucléaire devrait débuter vers 2020 avec la mise en service d'une 3^{ème} génération de réacteur, l'EPR (European Pressurized Reactor). Développé depuis 1990 dans le cadre d'un partenariat franco-allemand comprenant le concours de Framatome¹

¹ Le CEA a été également sollicité dans les études de R&D relatives à la gestion des accidents de dimensionnement ainsi qu'à la compréhension et la

et Siemens ainsi que des autorités de sûreté et des compagnies d'électricités concernées, l'EPR est un réacteur de type « évolutionnaire » : il constitue une amélioration des performances des réacteurs actuels sans rupture technologique au niveau de la conception (CAS, 2006 ; F.Carré et J.C.Petit, 2006). Parmi les avancées offertes par l'EPR par rapport aux derniers réacteurs construits en France, on peut citer les suivantes (Parlement, 2003) : une puissance unitaire accrue (1,5 à 1,6 millions de kW, contre 1,45 précédemment) ; un rendement du cycle de conversion d'énergie accru (36% contre 33%) ; une disponibilité accrue du réacteur grâce à une réduction des temps de charge du combustible ; une consommation de combustible réduite de 17% par kWh produit grâce à des températures de combustion accrues ; une durée de vie théorique qui passe de 40 à 60 ans ; une amélioration importante de la sûreté de l'installation par l'ajout de dispositifs de sûreté passive diminuant d'un facteur 10 la probabilité d'un accident grave (réduction de la probabilité de fusion du cœur du réacteur par la multiplication des systèmes de refroidissement, dispositif de récupération du cœur en cas de fusion, structure renforcée pour accroître la stabilité de l'installation en cas de séismes ou d'agression terroristes, automatisation de nombreuses fonctions) ; une réduction du volume des déchets de haute activité et à vie longue grâce à l'augmentation des températures de combustion ; réduction d'un facteur 2,5 de l'irradiation du personnel ; un coût de production du kWh réduit de 10% par rapport aux derniers réacteurs construits en France, donc inférieur de 20% par rapport aux filières cycle combiné à gaz (tout en comprenant les

modélisation des accidents graves (F.Carré et J.C.Petit, 2006).

coûts externes relatifs au cycle du combustible et au démantèlement, alors que, dans le cas du gaz, le coût externe des émissions de gaz carbonique n'est pas pris en compte).

L'un des enjeux du renouvellement du parc nucléaire français à partir de 2020 consiste à réaliser celui-ci de façon progressive, en s'appuyant sur la prolongation de la durée de vie des réacteurs existants. Autrement dit, il s'agit de ne pas reproduire la situation des années 1970 et 1980 durant lesquelles les investissements avaient été très concentrés dans le temps. L'étalement de la construction de nouveaux réacteurs doit permettre (Parlement, 2003) : de réduire le poids des investissements, d'éviter les défauts de conformité de composants dus à la précipitation, d'offrir une continuité dans la sollicitation des acteurs de l'industrie du nucléaire en France, de diversifier les réacteurs de remplacement au fur et à mesure de l'apparition de nouvelles solutions techniques combinant l'innovation et des concepts éprouvés.

⇒ *A partir de 2040 : la 4^{ème} génération ou les réacteurs révolutionnaires*

Parallèlement à la mise au point de l'EPR dans le cadre franco-allemand, la communauté nucléaire internationale (Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, France, Corée du Sud, Japon, Suisse, Royaume-Uni, Etats-Unis), réunie dans le cadre du Generation IV International Forum (GIF), s'est lancée depuis 2000 dans l'étude des réacteurs nucléaires dits de 4^{ème} génération, ceux-ci devant apporter, à l'horizon 2040/2050, des réponses novatrices aux problématiques fondamentales de la filière nucléaire (CES, 2006) : sur le plan environnemental, économiser la ressource fissile, produire beaucoup moins de déchets à vie longue, améliorer le rendement énergétique des centrales

nucléaires par le développement d'applications complémentaires (cogénération de chaleur industrielle et domestique, production d'hydrogène, désalinisation) ; sur le plan sociétal, renforcer la sûreté en faisant en sorte que le cœur des réacteurs ne soit jamais dégradé et que le fonctionnement de ceux-ci tolère l'erreur humaine au cours de leur exploitation ; sur le plan économique, présenter des coûts d'investissement et de fonctionnement encore plus compétitifs (moins de 1 000 dollars/kW à l'investissement, 2 à 3 cents/kWh pour le fonctionnement) et offrir des modèles à la puissance limitée (100 000 kW) afin de pouvoir adapter la filière nucléaire à tous types de réseau.

Dans ce cadre, on parle désormais de systèmes (et non plus seulement de réacteurs) car ceux-ci sont conçus pour prendre en compte, de manière intégrée, les impératifs à la fois du réacteur lui-même et du cycle du combustible (F.Carré et J.C.Petit, 2006). Les experts internationaux du GIF ont passé au crible des critères retenus une centaine de concepts différents de systèmes de production d'énergie nucléaire pour n'en retenir que six¹ répondant à l'objectif central de développement durable. Ce sont ces six concepts qui doivent faire l'objet à l'avenir d'importants programmes collaboratifs de R&D pour aboutir à la réalisation de démonstrateurs à échéance 2015 -2020 permettant de faire un choix raisonné en vue du développement industriel de certains d'entre eux. Pour sa part, la France, représentée dans le

¹ Les six concepts retenus sont les suivants : réacteurs à neutrons rapides à caloporteur sodium ; réacteurs à neutrons rapides à caloporteur gaz ; réacteurs à neutrons rapides à caloporteur plomb ; réacteurs à très haute température refroidi au gaz ; réacteurs à eau supercritique ; réacteurs à sels fondus.

« GIF » par le CEA, concentre ses efforts sur les « hautes températures » et « les réacteurs à caloporteur gaz », tout en maintenant son intérêt et son expertise sur les systèmes à neutrons rapides à caloporteur sodium, utilisant l'expérience acquise par le CEA sur les réacteurs à gaz et celle sur Phénix et Superphénix depuis une trentaine d'années. En l'état actuel d'avancement du processus, on constate que les travaux du GIF conduisent justement à reconnaître les systèmes nucléaires à neutrons rapides – surgénérateurs – avec recyclage intégral du combustible comme la solution la plus aboutie pour minimiser la radiotoxicité potentielle à long terme de déchets du cycle (F.Carré et J.C.Petit, 2006). En effet, alors que le plutonium présent dans les combustibles nucléaires usés est considéré comme un déchet de la filière REP (2^{ème} génération), c'est au contraire le matériau fissile de base des surgénérateurs (J.L.Bobin, H.Nifenecker, C.Stéphan, 2001).

La mise en œuvre des réacteurs de 4^{ème} génération suppose qu'un certain nombre de verrous technologiques soient levés (Parlement, 2003). En premier lieu, il n'existe pas encore de matériaux capables de résister à des températures de 900°C (voire de 1 650°C en conditions accidentelles) pour constituer le réacteur et les turbines. Ensuite, s'agissant du fonctionnement des réacteurs eux-mêmes, de nouveaux modèles informatiques ou codes de calcul devront être mis au point. Les combustibles à utiliser devront également pouvoir être enrichis à des teneurs supérieures aux 5% d'uranium 235 qui sont la règle dans les réacteurs à eau pressurisée actuellement en service.

⇒ *Au delà de 2070 : la fusion
thermonucléaire*

Outre la fission, l'énergie nucléaire peut se manifester par la fusion thermonucléaire. Découvert en 1938 par l'allemand Hans Albrecht Bethe qui cherchait à expliquer l'origine de l'énergie du Soleil et des étoiles, le cycle de la fusion thermonucléaire constitue une réaction se produisant à l'intérieur des étoiles à des températures extrêmement élevées. Il s'agit une réaction au cours de laquelle deux noyaux atomiques légers viennent en contact l'un de l'autre malgré les forces électriques qui les repoussent. Il résulte de ce contact la constitution d'un noyau atomique fusionné plus lourd que les noyaux initiaux ; cette fusion s'accompagne d'un intense dégagement d'énergie, supérieur à celui produit par la fission nucléaire. A partir de la découverte de la fusion thermonucléaire, de nombreuses recherches sont conduites tout au long du 20^{ème} siècle pour tenter de la reproduire sur Terre.

Une des réactions de fusion les plus énergétiques et les moins difficiles à réaliser est celle qui implique deux isotopes de l'Hydrogène, un noyau de Deutérium et un noyau de Tritium. Leur fusion produit un noyau d'Hélium et un neutron. C'est en analysant cette réaction que le physicien britannique John Lawson démontre en 1957 que, pour que celle-ci s'amorce et s'entretienne sans apport d'énergie extérieur, le mélange de Deutérium et de Tritium doit atteindre une température de 100 millions de degrés. Autrement dit, il faut une température très élevée pour vaincre la répulsion existant naturellement entre les noyaux atomiques chargés positivement. Ce milieu à haute température constitutif du Soleil et des étoiles est appelé plasma.

Dès lors, tout le problème consiste à réaliser artificiellement un plasma et à le maintenir

suffisamment longtemps pour pouvoir produire et récupérer de l'énergie. Les difficultés sont de deux ordres. Elles concernent d'abord le confinement du plasma, c'est à dire son maintien dans un volume délimité, pour éviter la dispersion des particules qui le composent. Ne pouvant être réalisé par des parois matérielles qui seraient immédiatement détruites par le plasma, le confinement serait possible grâce à des champs magnétiques puissants créés par des courants électriques. La première enceinte qui entoure le plasma sert à récupérer l'énergie des neutrons qui s'échappent du plasma, pour pouvoir chauffer de l'eau et produire de la vapeur. L'autre type de difficulté concerne le chauffage du plasma, qui nécessite des procédés très élaborés pour atteindre les niveaux de température requis. Deux voies sont notamment explorées : le chauffage par injection de particules neutres de haute énergie ; le chauffage par ondes électromagnétiques à des fréquences caractéristiques du milieu.

Les recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique débutèrent vers la fin des années 1940, indépendamment, aux Etats-Unis, en URSS et en Europe occidentale. Mais ce n'est qu'en 1963 qu'est mis en service le premier Tokamak (abréviation de Toroidal Kamera Magnit Katushka), machine à confinement magnétique permettant l'étude des plasma en fusion, inventée par le physicien soviétique Lev Andreevitch Artsimovitch. A partir des années 1970, des Tomakaks sont construits dans la plupart des laboratoires, sans jamais parvenir à produire la température nécessaire. Depuis les années 1980, on assiste à une convergence et à une mutualisation des efforts de recherche à l'échelle internationale. Ainsi, l'Union Européenne, les Etats-

Unis, la Russie, le Japon, la Chine et la Corée du sud se sont engagés à coopérer pour la mise au point d'un réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER). Après de longues années d'études préparatoires et de négociation, c'est finalement le site français de Cadarache qui a été retenu en 2005 pour la construction d'ITER, laquelle devrait durer dix ans. Devant apporter la preuve de la faisabilité technologique de la fusion thermonucléaire, ce réacteur est censé produire, pendant 400 secondes, 500 000 kW de puissance issues de la fusion, avec 50 000 kW de chauffage, et permettre de tester toutes les technologies liées au fonctionnement, à l'exploitation et à la maintenance de ce type de réacteurs. Sans garantie de réussite, le projet ne devrait pas aboutir à une exploitation industrielle avant 2070-2080 (Parlement, 2006). Il suscite pour cela de nombreuses critiques, chez les politiques comme chez les scientifiques. Selon P.Radanne (2005), la fusion thermonucléaire est une réaction qu'il est tout simplement impossible de reproduire sur Terre. Selon lui, les difficultés technologiques à surmonter – température, confinement, dégradation des matériaux du réacteur – sont telles qu'il existe une totale incertitude quant au prix du KWh produit.

L'intérêt de la fusion thermonucléaire repose sur plusieurs éléments (J.C.Laroche, 2006 ; Parlement, 2006). Tout d'abord, la sûreté d'une réaction à fusion nucléaire devrait être excellente puisqu'à la moindre perturbation du plasma, les conditions dans lesquelles peut se produire la réaction ne seront plus réunies et se traduiront par l'arrêt instantané de celle-ci. Par ailleurs, la fusion apporte une solution au problème des réserves en ressources, car celles qui lui sont nécessaires sont abondantes dans la nature : l'hydrogène, dont sont dérivés le

deutérium et le Tritium, est l'élément le plus universellement répandu puisqu'il représente 75% de la masse de l'univers et 90% des molécules qui le composent ; 30% de la masse du Soleil ; 70% de la surface terrestre. Ensuite, les combustibles comme les produits de réaction ne sont pas radioactifs ou toxiques, hormis le tritium, dont la durée de vie reste cependant très courte (dix ans) et la toxicité faible. Enfin, la réaction de fusion ne produit pas de gaz à effet de serre.

Le secteur de la production d'électricité : développer les filières fonctionnant grâce aux énergies renouvelables

Les énergies renouvelables suscitent un intérêt croissant dans la mesure où elles présentent de nombreux avantages. Tout d'abord, comme leur nom l'indique, elles représentent un gisement illimité et ne sont pas affectées par le problème d'épuisement. Ensuite, elles ne connaissent pas les mêmes limites écologiques que les énergies fossiles dans la mesure où leur utilisation génère d'une manière générale peu de gaz à effet de serre. Par ailleurs, elles n'exposent pas les populations aux mêmes risques que la fission nucléaire et sont plus accessibles que la fusion nucléaire dont les applications paraissent encore lointaines. Sur le plan économique, les énergies renouvelables sont à l'origine de nouvelles activités, offrant ainsi de véritables opportunités de développement. Enfin, les énergies renouvelables promeuvent un nouveau paradigme dans la relation des populations à l'énergie : autant la constitution de la filière nucléaire ne pouvait échapper à un modèle centralisateur au vu de la complexité et des enjeux de sûreté de la technologie, de ses difficultés pour atteindre la rentabilité, autant les énergies

renouvelables présentent la possibilité d'une connexion directe de la source d'énergie avec la source de besoin. En d'autres termes, alors que le développement de la filière nucléaire s'est réalisé dans le souci constant d'accroître la demande d'électricité pour garantir le maximum d'économies d'échelle¹, les énergies renouvelables laissent entrevoir à terme un modèle énergétique au sein duquel la production décentralisée tend peu à peu vers un objectif d'autonomie complète (J.C.Debeir, J.P.Deleage, D.Hemery, 1986).

En 2001, l'Union Européenne a adopté une directive promouvant le développement de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables. Cette directive fixe à chaque pays un pourcentage à atteindre pour sa production d'électricité à l'horizon 2010. Pour la France, il s'agit de porter ce ratio à 21%.

Une fois franchie l'étape de la mise au point, les énergies renouvelables peinent à se diffuser, en raison : de coûts d'investissement² et de coûts de production du KWh³ plus élevés que ceux des

¹ Entre 1974 et 1984, la consommation d'électricité des ménages sera multipliée par deux.

² Alors que le coût d'investissement dans la filière du cycle combiné au gaz naturel est inférieur à 500 euros/KW, il est généralement compris entre 1 500 et 3 000 euros euros/KW pour la filière éolienne et entre 5 000 et 9 000 euros par KW pour la filière photovoltaïque.

³ Suivant les variantes technologiques, les sites et la taille des installations, on observe les fourchettes de coûts suivantes (L.Mons, 2005 ; P.Radanne, 2005 ; CAS, 2006 ; Minefi, 2003) : 3 à 3,5 centimes d'euros par KWh pour les centrales nucléaires, 3,5 à 4 centimes pour les centrales au charbon et pour les centrales au gaz (cycle combiné), contre 5 à 13 centimes d'euros pour la filière éolienne, 15 centimes pour la filière géothermique et 25 à 125 centimes pour la filière solaire. Parmi les énergies renouvelables, la filière hydraulique est la seule à présenter des coûts compétitifs puisque s'échelonnant entre 2 et 10 centimes d'euros le KWh.

énergies traditionnelles ; de contraintes naturelles¹ (intermittence, dilution) encore difficiles à gérer en l'absence de moyens de stockage de l'électricité. De ce point de vue, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et l'énergie de la biomasse apparaissent comme les plus intéressantes à valoriser. Un rapport récent de l'Assemblée nationale (2003) indiquait d'ailleurs que l'intérêt d'un développement massif de la production d'électricité issue des énergies renouvelables reste limité dans une perspective de réduction des émissions de CO₂, la simple substitution systématique des centrales thermiques au charbon et au fioul par des centrales à gaz à cycle combiné offrant des résultats équivalents.

⇒ *L'énergie éolienne, d'abord un effet de mode*

Les vents sont dus aux variations de l'intensité des radiations solaires reçues à la surface de la Terre qui provoquent des différences de température, de densité et de pression. Il en résulte des circulations d'air à l'échelle planétaire. Techniquement, l'énergie éolienne pourrait fournir le tiers de l'électricité aujourd'hui consommée en France. Par ailleurs, la filière de production d'électricité d'origine éolienne voit sa compétitivité s'accroître d'année en année. Selon P.Radanne (2005), le coût du KWh éolien qui va descendre à 4 centimes d'euros d'ici 2015 du fait de l'industrialisation de la filière ; coût qui devient

totallement compétitif par rapport aux centrales électriques à combustibles fossile ou fissile.

L'énergie éolienne présente cependant plusieurs inconvénients (Parlement, 2006). Le premier réside dans le fait qu'une éolienne d'une centaine de mètres va produire une énergie de l'ordre de 1 500 à 2 500 kW quand un réacteur va développer 1,3 million de kW. A titre d'illustration, l'Allemagne qui possède le tiers de la puissance éolienne mondiale installée (16 millions de kW sur 46 millions de kW) n'en tire que 4% de sa production d'électricité. De ce point de vue, l'implantation de fermes d'éoliennes en mer semble être une réponse plus politique qu'économique. Cette technologie bénéficie d'une plus grande tolérance sociale, mais pour des rendements de 60% supérieurs aux fermes terrestres, leurs coûts d'implantation et d'entretien sont multipliés par deux (P.Radanne, 2005).

Ensuite, une éolienne ne fonctionne pas en permanence en raison du caractère intermittent et aléatoire de la source d'énergie (le vent) : en moyenne sur l'année, elle ne fonctionne qu'à 20% de sa pleine puissance². Cette imprévisibilité de l'énergie produite pose de sérieux problèmes de gestion pour sa mise sur le réseau, au point que le plus grand producteur allemand d'électricité a pu dire publiquement que pour lui les éoliennes étaient un problème lorsqu'il y avait du vent. De plus, l'apport de l'énergie éolienne apparaît particulièrement limité lors des pics de consommation qui correspondent souvent à des périodes de temps froid ou de canicule, conditions

¹ Les durées d'utilisation des énergies renouvelables sont inférieures à celles des énergies fossiles ou nucléaire (Parlement, 2006). Comparées aux 8 000 heures d'une centrale nucléaire de type EPR, la durée d'utilisation moyenne annuelle pour la France dans son ensemble, est de 1 000 heures pour le photovoltaïque, de 2 500 heures pour l'éolien, de 2 000 heures pour un barrage sur retenue, de 5 000 heures par an pour l'hydroélectricité au fil de l'eau, de 500 heures à 5 000 heures pour l'hydroélectricité par pompage.

² Il faut un vent minimum de 3 à 5 m/s (11-18 km/h) pour qu'une éolienne démarre et qu'au delà de 25 m/s (90 km/h), celle-ci est stoppée (Parlement, 2006).

climatiques anticycloniques durant lesquelles le vent est très faible.

Par ailleurs, l'emprise sur le paysage et le bruit des éoliennes apparaissent pour certains comme une véritable nuisance. Les éoliennes sont ainsi victimes du syndrome NIMBY (Not In My Back Yard, « pas dans mon jardin »), terme qui stigmatise l'attitude des populations cherchant à reporter sur les autres les préjudices dus aux activités humaines (J.C.Laroche, 2006).

Au total, en l'absence de progrès de rupture sur le stockage de l'électricité et du fait de la puissance installée requise pour assurer une production garantie donnée, il apparaît peu probable que l'énergie éolienne puissent constituer une réponse centrale à la demande d'énergie des prochaines décennies (Groupe « facteur4 », 2006).

⇒ *L'énergie solaire, un potentiel important mais encore bien trop coûteux*

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire de l'électricité grâce à la conversion photovoltaïque. Celle-ci repose sur l'assemblage en panneaux de cellules photoélectriques, comportant généralement du silicium, qui transforment l'énergie apportée par le rayonnement solaire (photons) en énergie électrique. D'un point de vue technique, le potentiel de l'énergie photovoltaïque paraît particulièrement intéressant dans la mesure où il autorise la production décentralisée d'électricité. Avec les techniques commercialisées aujourd'hui il faut 10 m² de modules photovoltaïques pour obtenir 1 kW de puissance et 1 000 kWh par an. Cela signifie que si les 10 000 km² de toitures de la France étaient utilisées comme générateur solaire, la production serait de 1 000 milliards de kWh par an, soit plus du double de la consommation annuelle finale d'électricité en France (Ministère délégué à la

recherche, 2004). La France apparaît est d'ailleurs très en retard par rapport à des pays comme le Japon et l'Allemagne en ce qui concerne la puissance de production photovoltaïque installée (Parlement, 2006) : en 2005, 26 000 kW sont déployés en France contre 794 000 kW en Allemagne.

Le développement massif du solaire photovoltaïque se heurte cependant actuellement à plusieurs limites. Une première limite est commune avec la filière éolienne : la variabilité de la disponibilité de la puissance fournie (seulement le jour et moindre en cas de temps nuageux) appelle le développement des technologies de stockage de l'électricité ou l'utilisation de solutions énergétiques complémentaires. Une seconde limite de taille du solaire photovoltaïque réside dans sa faible compétitivité économique ; il apparaît clairement comme la filière énergétique la plus coûteuse de toute. Cette deuxième limite s'explique principalement par le fait que le rendement du processus de conversion photovoltaïque du rayonnement solaire (photons) est encore faible : entre 6 et 20% selon la qualité du silicium utilisé (Parlement, 2006). Les photons faiblement énergétiques ne peuvent en effet être utilisés puisqu'ils ne permettent pas à la conversion de s'enclencher. Symétriquement, si les photons hautement énergétiques sont certes absorbés par les cellules photovoltaïques, seule une partie de leur énergie est transformée en énergie électrique, le reste étant dissipée en chaleur. Enfin, il faut signaler l'existence d'autres butées techniques : tenue des matériaux dans la durée, conversion du courant continu obtenu en courant alternatif pour le raccordement au réseau. Au total, l'avenir de l'énergie solaire photovoltaïque suppose la mise au

point de nouvelles générations de cellules photoélectriques permettant de dépasser les 50% de rendement de conversion énergétique.

⇒ *L'énergie hydraulique, la plus performante et la plus exploitée des énergies renouvelables*

L'hydroélectricité renvoie tout d'abord à l'exploitation de la force des cours d'eau, qu'ils soient situés en montagne ou en plaine. Jusqu'à l'essor de la filière au fioul durant les années 1960 et de la filière nucléaire durant les années 1970, l'hydroélectricité a représenté la plus grande part de la production d'électricité en France. En effet, notre pays a déjà réalisé la mise en exploitation de 70% de son potentiel hydroélectrique rentable, au regard du coût des autres énergies et dans les conditions économiques actuelles (Minefi, 2006). De fait, en 2004, près de 95% de la production électrique française d'origine renouvelable provenait de l'hydroélectricité ; la part de l'hydraulique dans la production totale d'électricité en France ne représente toutefois plus que 10% en 2005 (CAS, 2006). Dans la perspective d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre de la France, la poursuite de l'équipement du territoire national paraît souhaitable. Les 30% du potentiel hydroélectrique restant à exploiter représentent en effet près de 30 milliards de kWh/an.

Le potentiel supplémentaire identifié implique la réalisation de suréquipements sur les installations existantes dont la puissance est inférieure à 10 000 kW et la construction de nouvelles installations de puissances comprises entre 10 000 et 50 000 kW. Ce potentiel supplémentaire peut être décliné en trois grandes catégories, les stations de pompage constituant un cas spécifique (Minefi, 2006).

- La grande hydraulique : elle représente le potentiel le plus important en valeur absolue,

23,4 milliards de kWh par an pour une puissances installées d'environ 18,2 millions de kW. Sur cette évaluation, les nouveaux aménagements représentent 74% de la puissance considérée, les suréquipements sur les installations existantes le reste.

- La petite hydraulique : concernant les centrales dont la puissance est comprise entre 100 et 10 000 kW, son potentiel de développement est estimée à 3 à 4 milliards de kWh/an, soit 750 000 kW de puissance installée.

- La très petite hydraulique : Sur les 100 000 moulins qui existaient au 19^{ème} siècle, des études montrent que 30 000 peuvent être équipés, sans changer la configuration de la rivière, à condition de mettre au point les matériels pour exploiter cette énergie à des coûts raisonnables. Des avancées techniques sur le matériel de production sont en cours à partir de turbines adaptées aux « très basses chutes » particulièrement conçues pour être installées sur les ouvrages existants sans gros travaux de génie civil. La puissance potentielle de chacune de ces petites centrales serait comprise entre 10 kW et 100 kW, pour un potentiel de production total estimé à 1 milliards de kWh/an. L'aménagement de ces petites chutes, par les profits qu'elles généreraient, aurait également l'avantage de dégager des financements nouveaux permettant l'entretien des cours d'eau correspondants, lequel est actuellement souvent négligé.

Toutefois, la mise en valeur de ce potentiel se heurte aujourd'hui à l'évolution que la société entend donner à l'utilisation de l'eau à des fins énergétiques parmi tous les autres usages (Minefi,

2006) : eau laissée « sauvage » pour la préservation de l'environnement et des sites, eau pour la pêche, eau pour l'agriculture, eau pour le tourisme, etc. De fait, les réglementations environnementales encadrant les installations hydroélectriques ont été nettement durcies ces dernières décennies afin de réduire les impacts sur les écosystèmes locaux. Parmi ces contraintes, on peut citer les : parc naturel (régional ou national) ; cours d'eau « réservé » (sur lesquels aucune concession ou autorisation nouvelle ne peut être donnée) ; SIC (Site d'Importance Communautaire pour la protection de l'environnement) ; ZPS (Zone de Protection Spéciale de l'environnement) ; cours d'eau classé (sur lesquels les ouvrages hydrauliques sont soumis à l'obligation de libre circulation des poissons migrateurs). Compte tenu de ces contraintes, le potentiel hydroélectrique réellement exploitable est réduit à 13,4 milliards de kWh/an. En toute logique, ce recadrage concerne principalement la grande hydraulique, celle-ci engendrant les impacts environnementaux les plus importants.

Pourtant, l'hydroélectricité possède des atouts irremplaçables : elle ne produit pas de CO₂ lors de son fonctionnement ; elle présente de faibles coûts d'exploitation grâce à des investissements à très longue durée de vie ; elle constitue une technologie expérimentée présentant les performances de conversion entre énergie primaire (énergie cinétique de l'eau) et énergie finale (électricité produite) les plus élevées (supérieur à 90%) de toutes les filières de production d'électricité (CAS, 2006) ; caractéristique unique parmi les énergies renouvelables, elle offre une production à la fois continue (sans intermittence) et stockable (lorsque

l'infrastructure est adossée à un réservoir¹ de type lac ou barrage). Le fait que l'hydroélectricité soit un outil essentiel de la modulation de l'offre d'électricité en fonction de la demande en France est un point essentiel. Il indique que développer les installations hydroélectriques modulables permettrait de réduire, ou simplement maintenir, le recours aux centrales thermiques fonctionnant aux énergies fossiles pour compléter le besoin de modulation. De ce point de vue, la priorité semble aller à la poursuite de l'équipement des installations existantes en Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) ; celles-ci constituent des systèmes de pompe permettent de remonter l'eau d'un bassin inférieur à un bassin supérieur aux moments de la journée ou de la semaine pendant lesquels la demande est faible, pour les turbiner lors des pointes de consommation. Le potentiel de développement des STEP est estimé à 4 300 millions de kW.

Les courants marins représentant une autre forme d'énergie hydraulique, dont l'exploitation pourrait se développer dans les années à venir. On assiste en effet à la multiplication des expérimentations d'hélices immergées dans des zones littorales à fort courant, appelées hydroliennes puisque constituant en quelque sorte des éoliennes sous-marines. Les sites d'implantation situés à proximité des côtes sont cependant assez rares car ils exigent au minimum des courants de 4 noeuds. En outre, cette technologie se heurte à des problèmes liés aux agressions des milieux marins (corrosion, action des algues, et des micro-organismes). Cependant, un pays comme la France possède un potentiel intéressant (Bretagne, Cotentin). Et il dispose d'un

¹ Ainsi, sur une puissance hydroélectrique totale de 25 millions de kW actuellement installée en France, 12 millions sont modulables (Minefi, 2006).

savoir-faire technologique lié à l'usine marémotrice de la Rance (Parlement, 2006)

⇒ *L'énergie géothermique, un potentiel considérable et des performances élevées*

La température de la Terre croît en moyenne de 3°C tous les 100 mètres quand on s'enfonce dans le sol, mais peut s'élever de 40°C dans les régions volcaniques (J.C.Lhomme, 2001). Quoi qu'il en soit, pour pouvoir obtenir une chaleur suffisante (250-350°C) pour produire de l'électricité, il faut aller puiser cette énergie en profondeur, entre 1 500 et 3 000 mètres. Cette démarche est prometteuse : la géothermie est la source d'énergie renouvelable offrant les flux énergétiques les plus constants – c'est à dire non dépendants des conditions naturelles ou climatiques contingentes – donc permettant des fonctionnements en base, comme l'énergie nucléaire (Ministère délégué à la recherche, 2004).

L'Italie est le seul Etat membre de l'Union européenne à avoir une production notable dans ce domaine avec plus de 5 milliards de kWh en 2004, soit 98% de la production géothermique européenne (Parlement, 2006). En France, il faut souligner l'expérimentation conduite actuellement à Soultz-sous-Forêts en Alsace. Ce programme de recherche, mené par Shell et EDF, a pour objectif l'exploitation d'une source nouvelle d'énergie par la valorisation de la chaleur des roches chaudes sèches fracturées situées à quelque 5 000 mètres de profondeur, à des températures supérieures à 200°C. Le principe de fonctionnement est le suivant : en stimulant les fractures existantes dans le massif rocheux par des injections d'eau sous pression, un échangeur thermique profond a été ainsi créé de façon artificielle. Si l'expérience se révèle positive, le potentiel de la géothermie s'en

trouverait considérablement accru. L'exploitation de la chaleur de la terre ne serait alors pas limitée aux seules formations rocheuses renfermant des eaux souterraines naturelles mais à toutes les zones profondes de la croûte terrestre. Ainsi, Shell et EDF ont fait valoir qu'en exploitant seulement 10% des ressources potentielles de l'Europe, on pourrait produire plus de 900 milliards de kW par an, soit deux fois la consommation électrique française (Sénat, 2006).

⇒ *L'énergie de la biomasse, valoriser les déchets*

Les déchets de la biomasse peuvent servir à la production de biogaz¹, lequel peut ensuite être utilisé dans les centrales à gaz. La production de biogaz s'obtient par la fermentation anaérobie – c'est à dire en l'absence d'air et donc d'oxygène – des déchets de la biomasse (Sénat, 2006) : produits et déchets forestiers et agricoles (bois, résidus de scieries, pailles...), de déchets d'élevage (sous-produits animaux, lisiers de porcs, déjections bovines, fientes de volaille, farines animales...), de la fraction biodégradable (ou part fermentescible) des déchets industriels banals et déchets ménagers (c'est-à-dire biodéchets, déchets verts...).

Trois sources principales existent : les usines de traitement des eaux usées (boues d'épuration), les décharges, la méthanisation des déchets fermentescibles. La différence entre biogaz de décharge et biogaz de méthanisation réside essentiellement dans les volumes de méthane produit. Dans le premier cas, les décharges recueillent des déchets organiques en faible quantité qui produisent « naturellement » du biogaz

¹ Le biogaz a une composition variable comportant essentiellement (de 40 à 70%) du méthane (CH₄), identique au méthane fossile enfoui dans les entrailles de la terre.

sans aucun procédé industriel. En conséquence, la production de méthane est nécessairement limitée. Dans le second cas, l'opération de production de biogaz de méthanisation est conduite, à partir de déchets organiques très abondants, dans des digesteurs, enceintes confinées à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées pendant une à trois semaines : il s'agit en quelque sorte d'accélérer le processus de fossilisation qui dure normalement des siècles.

Aujourd'hui, on estime que la production de biogaz pourrait couvrir jusqu'à 10% de notre consommation actuelle de gaz naturel. En la matière, avec 0,36 million de tep produites en 2005, la France arrive une nouvelle fois loin derrière ses voisins européens : les leaders de la production de biogaz sont le Royaume-Uni avec 1,47 million de tep et l'Allemagne avec 1,29 million de tep (Sénat, 2006).

Le secteur de la production d'électricité : réduire l'utilisation des centrales fonctionnant à l'aide de combustibles fossiles par l'amélioration des technologies de stockage de l'électricité

La demande d'électricité varie selon l'heure de la journée et la période de l'année. Or, la production d'électricité d'origine nucléaire se caractérise par la grande rigidité de son niveau de débit, tandis que celle d'origine renouvelable se distingue par des variations importantes journalières et saisonnières qui ne sont pas toujours prévisibles. Dès lors, à l'heure actuelle, les pics de la demande sont pris en charge par les centrales de production les plus flexibles dans leur fonctionnement, à savoir celles

alimentées au gaz et au charbon¹, avec les émissions de CO₂ que l'on sait.

Pouvoir saffranchir de ce recours aux centrales thermiques classiques suppose de rendre possible le stockage en grande quantité de l'électricité produite. Autrement dit, il s'agit d'aller au delà du stockage artificiel réalisé dans la filière hydroélectrique : afin de pouvoir répondre pleinement aux pics de consommation, on réalimente volontairement les réserves d'eau des barrages hydro-électrique sans attendre les précipitations, grâce à des pompes fonctionnant durant les périodes de faible consommation d'électricité ; une évolution significative de ce type de stockage pourrait être d'assurer cette opération de pompage à partir de l'énergie solaire. Plusieurs pistes de stockage de l'électricité existent.

⇒ L'évolution des accumulateurs électriques

Plusieurs types de batterie existent actuellement sur le marché (Parlement, 2005).

- Les batteries au plomb : Ce sont les plus anciennes puisqu'elles datent du 19^{ème} siècle. Elles constituent une technologie éprouvée et sûre dont le coût moyen est faible (200 €/kWh). Son principal handicap est sa faible densité massique en énergie (30 Wh/kg). Aujourd'hui, elles semblent offrir le meilleur rapport performance/prix pour le système de motorisation hybride « stop & start » demandant peu d'énergie.

- Les batteries utilisant une électrode Nickel : Au début des années 1990, les recherches menées depuis le premier choc pétrolier

¹ La diffusion des centrales électrique à cycle combiné et à cogénération dans les pays développés tend cependant à limiter les émissions de CO₂ issues de ces centrales thermiques puisqu'elle repose sur une utilisation du gaz.

semblent avoir porté leurs fruits avec la mise au point des batteries Nickel-cadmium, deux fois plus puissante que le plomb (55-60 Wh/kg), mais aussi trois fois plus chère (600 €/kWh). Pour une utilisation à des fins de motorisation électrique de véhicules, placées sous le capot ou dans le coffre, elles augmentent le poids du véhicule de plus de 200 kilos. Autres batteries utilisant une électrode Nickel, les batteries nickel-hydrure de métal sont apparues en 1997 et développent une puissance de 65 à 70 Wh/kg, ce qui, à poids égal, donne une autonomie supérieure de 30%, soit 120 kms. Elles sont pour l'instant essentiellement utilisées dans les véhicules hybrides (Toyota Prius et Lexus RX400 h) et produites par des firmes japonaises (Panasonic, Matsushita, Sanyo).

- Les batteries au lithium-ion : Ce sont les plus récentes et les plus prometteuses puisqu'elles recèlent une puissance de 120-140 Wh/kg, soit deux fois plus de puissance que le nickel-hydrure de métal, ce qui porterait l'autonomie des véhicules électriques à une fourchette comprise entre 200 et 300 km. Le coût de revient du lithium-ion est en outre très inférieur aux batteries utilisant une électrode Nickel (250 €/kWh environ). Peu de sociétés en fabriquent pour assurer l'alimentation de véhicules électriques, l'essentiel des usages étant actuellement réservés pour l'instant à l'électronique portable.

Au total, au vue de leur capacité encore limitée, les accumulateurs électriques sont davantage pertinents pour des utilisations domestiques (maison isolée par exemple) que pour des applications automobiles. Par ailleurs, les

accumulateurs présentent l'inconvénient d'être long à charger et de fournir moins d'énergie électrique que leur charge n'en consomme (les réactions électrochimiques s'accompagnent d'une assez forte libération de chaleur). Les accumulateurs électriques posent enfi des problèmes de recyclage en fin de vie (Parlement, 2001). Les batteries Nickel-cadmium vont ainsi progressivement disparaître en raison de l'évolution des normes environnementales (dangerosité du cadmium).

⇒ *La conversion de l'électricité en hydrogène par électrolyse de l'eau*

Une autre possibilité de stockage réside dans l'utilisation de l'électricité produite durant les heures creuses pour l'électrolyse de l'eau, laquelle produit de l'hydrogène et de l'oxygène. Ce procédé de l'électrolyse est connu depuis le 19^{ème} siècle. Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont immergées dans de l'eau. Lorsque l'ensemble est traversé par un courant électrique continu, l'hydrogène se concentre sous la forme de bulles autour de l'électrode chargée négativement (la cathode) et l'oxygène autour de l'électrode chargée positivement (l'anode).

Stockée sous forme d'hydrogène, l'électricité produite serait ensuite récupérée, soit par la combustion de l'hydrogène dans les centrales thermiques à gaz, soit par la conversion de l'hydrogène en électricité grâce à une pile à combustible. Fonctionnant selon la réaction inverse de l'électrolyse, les piles à combustible n'emmagasinent aucune énergie chimique (à la différence des batteries électriques) mais convertissent en électricité l'énergie chimique d'un carburant qui les alimente (J.Rifkin, 2002). L'hydrogène est ionisé au niveau de l'anode par le catalyseur, c'est à dire dissocié en protons et en

électrons ; les protons transitent de l'anode vers la cathode où ils se combinent à l'oxygène de l'air pour donner de l'eau ; les électrons rejoignent la cathode en transitant par un circuit externe, lequel récupère l'énergie électrique ainsi produite. Les piles à combustible produisent de l'énergie avec une efficacité deux à trois fois supérieure à celle des systèmes conventionnels. Elles peuvent avoir n'importe quelle dimension, pouvant aussi bien être placée dans une voiture que générer l'électricité nécessaire pour alimenter une ville (J.C.Laroche, 2006).

Par ailleurs, l'hydrogène apparaît comme un vecteur de transport de l'énergie plus performant que l'électricité. Recourant aux pipelines, le transport de l'hydrogène pourrait se faire, avec des pertes inférieures à celles du transport d'électricité (J.L.Bobin, H.Nifenecker, C.Stéphan, 2001).

Pour que ce dispositif de stockage puisse se développer, plusieurs obstacles doivent cependant être levés. Tout d'abord, à l'heure actuelle, le rendement de l'électrolyse de l'eau reste médiocre parce qu'il dépend de la quantité d'énergie utilisée¹ (Ministère délégué à la recherche, 2004). Cette méthode est d'ailleurs marginale dans la production mondiale d'hydrogène qui s'effectue essentiellement par un traitement des combustibles fossiles. Ensuite, la question du stockage de l'hydrogène en grande quantité n'est pas encore complètement résolue. L'hydrogène a un pouvoir calorifique important mais il est très léger : 5 à 7 kg

¹ L'électrolyse est mise en oeuvre actuellement au plan industriel à une température de 100°C avec un rendement très faible. Pour se rapprocher du rendement maximum théorique de l'électrolyse, qui est de 50%, il faudrait atteindre des températures allant de 700 à 1000°C. La mise au point de réacteurs nucléaires de 4^{ème} génération à hautes températures (900°C) constitue la voie la plus prometteuse à terme (Parlement, 2006).

de produit assurent une autonomie de l'ordre de 500 km ; en revanche, à température ambiante, 1kg d'hydrogène occupe un volume de 12 m³. La compression et la liquéfaction offrent des solutions pour réduire ce volume, mais au prix de consommations d'énergie importantes. Cette question est d'autant plus importante que l'hydrogène présente une dangerosité intrinsèque liée à son caractère explosif au contact de l'air (oxygène) ou de sources de chaleur (CES, 2006). Troisièmement, le transport de l'hydrogène suppose des investissements considérables en matière d'infrastructures si l'on souhaite le substituer au transport de l'électricité². Enfin, en ce qui concerne la pile à combustible, dans l'état actuel de la technologie, tout repose sur le platine comme élément de catalyse. Or on extrait seulement 200 à 300 tonnes de ce métal par an. Le nombre théorique de pile à combustible que l'on peut construire paraît donc très limité.

Troisième levier technologique : séquestrer les émissions de CO₂ à la source

Parce que le charbon est la ressource fossile la plus abondante et la mieux répartie dans le monde, et que le pétrole reste fondamentalement la première

² Selon une étude menée par « Général Motors », la distribution d'hydrogène atteindra sa taille critique lorsqu'elle touchera 70 % de la population des pays ayant les plus forts taux de motorisation. Or pour atteindre cet objectif, il faudrait un réseau de 11 700 stations services, pour les États-Unis, 14 000 pour le Canada et le Mexique, autant pour l'Europe et 4000 pour le Japon. Sur la base d'un million de dollars pour chaque installation, cette projection aboutirait à ce que les pays du G8 dégagent entre 25 et 26 milliards d'euros de fonds pour réaliser les investissements nécessaires (CES, 2006).

énergie du développement¹, le classement des consommations énergétiques demeurera longtemps soumis à la loi des facilités de transport (P.Radanne, 2005). Dès lors qu'il s'agit malgré tout de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la capture et le stockage du dioxyde de carbone issu de la combustion des énergies fossiles, qui devrait donc se poursuivre à l'avenir, paraît indispensable. Pour ce faire, deux types de dispositifs seraient disponibles à terme : à l'horizon de la prochaine décennie, une filière industrielle articulant des phases de capture, de transport et de stockage du carbone ; dès aujourd'hui, une filière sylvoicole consistant à optimiser le pouvoir de captation du carbone par la ressource forestière.

Les dispositifs techniques de capture et de stockage du dioxyde de carbone sur les sites d'émissions concentrées

⇒ La capture

Trois grands types de technologies sont envisagés pour réaliser la capture du CO₂ issu de l'utilisation de combustibles fossiles (Parlement, 2006 ; Ministère de l'écologie et du développement durable, 2006) :

- La capture postcombustion :

Pour les installations existantes, la séquestration du CO₂ peut être effectuée par un traitement aval des fumées (séparation du CO₂ des autres composantes). Le procédé le plus utilisé est la capture du CO₂ par des amines (composés azotés). Les amines sont ensuite régénérées et recyclées. Consommateur d'énergie – après avoir quitté

l'épurateur, l'amine est réchauffée pour libérer du CO₂ très pur – ce procédé est, au total, coûteux.

- La capture après oxycombustion :

Une autre voie de capture postcombustion, mais concernant les installations nouvelles, consiste à enrichir le taux de CO₂ des fumées. Pour ce faire, lors de la combustion de ressources fossiles, l'air est remplacé par de l'oxygène ce qui ne produit que des émissions de CO₂ et d'eau, dont il est facile de séparer le CO₂.

- La capture précombustion :

Piste la plus prometteuse pour des installations nouvelles, notamment dans le cas de la production d'électricité, la capture précombustion consiste en la décarbonatation du combustible. La gazéification du charbon à l'oxygène pur permet de séparer le carbone de l'hydrogène. Le combustible obtenu est alors moins carboné que l'initial. Il peut être utilisé dans les centrales à turbine à gaz à cycle combiné et cogénération ou dans des piles à combustibles décrites plus haut. Il s'agit d'un cycle complexe exigeant plusieurs transformations et donc des pertes de rendements intrinsèques. Il demande encore plusieurs avancées technologiques pour être maîtrisé (J.L.Bobin, H.Nifenecker, C.Stéphan, 2001). En la matière, les Etats-Unis se sont lancés vers la mise au point d'une centrale électrique à charbon zéro émissions.

Ces techniques de capture induisent à l'heure actuelle des coûts importants, de 40 et 60 euros la tonne de CO₂ selon Gaz de France.

⇒ Le transport

¹ Où que l'on soit, on arrive à faire venir un camion citerne tandis que les autres énergies exigent davantage d'infrastructures pour leur acheminement.

Le stockage géologique sous chaque installation faisant l'objet de capture de CO₂ exigerait que le milieu géologique soit favorable et multiplierait les coûts de forage. Le transport du CO₂ vers des sites de stockage mutualisés s'impose donc.

Sur le plan technique, le transport du gaz carbonique, qui s'apparente à celui du GPL (gaz de pétrole liquéfié), est déjà maîtrisé. Les premiers gazoducs de transport du CO₂ sont entrés en service aux États-Unis au début des années 1970. Le CO₂ peut être également transporté par bateau, à une pression de 7 bar, et par le rail ou la route à la température de -20°C et à une pression de 20 bar.

Le financement des installations de collecte et de transport pourrait s'avérer lourd si les gazoducs ou les méthanières existants ne pouvaient être utilisés, ce qui est le plus probable compte tenu de l'essor des utilisations du gaz naturel et du gaz naturel liquéfié. Gaz de France estime ainsi à hauteur de 2 à 20 euro la tonne les coûts de transport du CO₂.

⇒ *Le stockage*

Le problème de l'entreposage à long terme du CO₂ ainsi récupéré (sous forme de gaz liquéfié) est plus complexe, compte tenu des volumes énormes mis en jeu. Plusieurs techniques de séquestration sont aujourd'hui envisagées (Parlement, 2006) :

- le stockage sous forme de minéralisation : source d'une consommation d'énergie importante, il est d'un coût élevé, de l'ordre de 60 à 120 euros la tonne de CO₂ selon le GIEC ;
- le stockage océanique à très grande profondeur : il présente des risques importants de libération ultérieure de CO₂, et donc de non acceptation sociale. Son coût serait de l'ordre de 6 à 36 euros la tonne selon le GIEC ;

- le stockage en couches géologiques profondes : Trois grands types de formations géologiques peuvent être utilisés à cette fin : les gisements de charbon inaccessibles ou inexploitable ; les gisements d'hydrocarbures anciens ou toujours en exploitation ; les bassins sédimentaires et des aquifères salins. La première piste présente l'intérêt de permettre la récupération du méthane fixé sur le charbon grâce à l'injection de CO₂. Selon le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), la capacité mondiale de stockage des gisements de charbon inaccessibles ou inexploitable serait de 40 milliards de tonnes de CO₂. La seconde piste est également tout à fait pertinente puisque l'injection de CO₂ permet d'accroître les quantités de pétrole récupérées. Selon le BRGM, la capacité mondiale de stockage des réservoirs d'hydrocarbures serait de 950 milliards de tonnes de CO₂. La troisième hypothèse présente l'intérêt d'être la plus sûre en matière de stabilité du stockage du CO₂ dans la durée et d'offrir des possibilités à proximité de la plupart des installations industrielles. Selon le BRGM, la capacité mondiale de stockage des aquifères profonds représenterait de 400 à 10 000 milliards de tonnes de CO₂. Le stockage géologique offre ainsi des capacités presque illimitées puisque équivalente à plusieurs centaines d'années de d'émissions de CO₂ cumulées¹. De plus il présente les

¹ En France, les capacités de stockage des gisements d'hydrocarbures déplétés de Chaunoy dans le Bassin parisien est estimé à 50 millions de tonnes de CO₂, celui de Lacq à 250 millions et celui de Parentis à 125 millions, soit au total environ 400 millions de tonnes de CO₂. Il faut y ajouter le potentiel des aquifères salins profonds

coûts les plus faibles, situés dans une fourchette de 0,5 à 10 euros par tonne de CO₂ selon Gaz de France.

Plusieurs projets de stockage géologiques ont déjà vu le jour, notamment au Canada, en Norvège, aux Pays-Bas... Dans le cas de ce dernier pays, le gouvernement néerlandais a retenu un projet de Gaz de France (projet OMC : offshore injection of CO₂). Le projet vise à séquestrer du CO₂ par 3 500 à 4 000 m de profondeur dans un gisement de Gaz de France (CES, 2006). P.Radanne (2005) remarque toutefois que les capacités de stockage sont inégalement réparties dans le monde, offrant un réel avantage à long terme aux pays les mieux dotés, tels les Etats-Unis.

Au total, par l'ampleur du coût qu'il induit – de 42,5 et 90 euros la tonne de CO₂ – le processus de capture-transport-stockage du CO₂ ne paraît économiquement crédible que pour des installations importantes, par exemple celles consommant plus de 100 000 tep par an (Assemblée nationale, 2006). Il s'appliquerait donc pour l'essentiel à la production électrique d'origine thermique, au raffinage du pétrole, à la sidérurgie, aux cimenteries et à la chimie lourde. S'appliquant aux seules sources statiques d'émissions massives et avec des résultats qui ne suppriment pas les rejets à 100%, ce processus de séquestration du CO₂ ne permettrait de prendre en charge que 20% des émissions annuelles mondiales (Parlement, 2006).

Renforcer les puits à carbone naturels que sont les végétaux

Les écosystèmes participent également au piégeage du CO₂. Sur les 22 milliards de tonnes

émises chaque année dans le monde, seulement la moitié reste dans l'atmosphère, l'autre moitié étant absorbée, à part à peu près égale, par l'océan et la végétation terrestre (photosynthèse). Un moyen de réduire l'impact des rejets de CO₂, notamment des rejets dispersés (émis par les véhicules notamment) consisterait donc à favoriser ces puits naturels de CO₂, notamment par la reforestation. L'agriculture et la sylviculture sont en effet les seules activités humaines à pouvoir actuellement créer du stockage de carbone.

Une forêt exploitée de manière dynamique stocke plus de carbone qu'elle n'en rejette, tandis qu'une forêt non gérée est émettrice nette de gaz à effets de serre, notamment parce que le bois qui pourrit dans l'eau émet du méthane (CH₄) et que le fait de laisser se dégrader ou brûler à l'air libre des produits forestiers en fin de vie revient à déstocker du carbone sans aucun bénéfice atmosphérique (Sénat, 2006). Concrètement, en France, pour capter chaque année dans l'atmosphère 100 millions de tonnes de CO₂, il suffit de disposer de 5 millions d'hectares de «forêts» productives et exploitées (à 20 m³/ha/an) plantées sur des terres (agricoles ou forestières) pas ou peu valorisées à ce jour (Groupe « Facteur 4 », 2006). Ces surfaces qu'il est possible de constituer produiraient elles-mêmes 100 millions de m³/an de «matériaux fibreux cellulosiques» offrant une valeur énergétique «renouvelable» de l'ordre de 25 millions de tep/an (bio-chaleur, biocarburants de 2^{ème} génération...).

qui devrait être de 1 à 25 milliards de tonnes de CO₂ (Parlement, 2006).

LES PRINCIPAUX ACTEURS DE LA RECHERCHE EN MATIÈRE DE TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES EN RÉGION LYONNAISE

La région lyonnaise se veut actrice de l'avenir énergétique. Elle comprend en effet de nombreux organismes (grandes entreprises, PME-PMI, laboratoires de recherche publics) impliqués dans des travaux de recherche s'inscrivant dans les perspectives décrites plus haut. Au delà du recensement exhaustif de ces organismes, il est important de mettre en évidence les plus importants d'entre eux à l'échelle internationale, ainsi que les actions qu'ils conduisent actuellement, au sein notamment de différents pôles de compétitivité.

Les acteurs lyonnais des technologies d'économie d'énergie

Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur des transports

⇒ *L'amélioration des moteurs conventionnels, voie de recherche majeure de l'IFP et le pôle de compétitivité lyonnais « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »*

L'Institut Français du Pétrole (IFP), dont la principale antenne de recherche (630 personnes) est basée à Solaize au sud de Lyon, poursuit des recherches dans les principales directions décrites plus haut en ce qui concerne l'amélioration de l'efficacité des moteurs conventionnels :

- l'amélioration de l'injection directe sur les moteurs existants : Dans ce domaine, les travaux visent à élaborer des algorithmes et

des stratégies de contrôle électronique du moteur innovants et robustes. L'IFP a ainsi développé ses propres structures de contrôle du couple pour des applications sur moteurs essence, diesel et gaz naturel. Le calibrage – c'est-à-dire le paramétrage du système de contrôle électronique – fait également l'objet de travaux importants.

- la généralisation de la suralimentation à des fins de « downsizing » : La réduction de la consommation des moteurs diesel grâce à la suralimentation et l'adaptation de ce principe aux moteurs essence constitue un axe de recherche important de l'IFP. Celui-ci poursuit notamment les améliorations de son procédé basé sur le balayage des gaz brûlés résiduels. Ce dernier, développé à l'origine sur une base moteur à injection directe (IDE), est désormais complètement validé en injection indirecte avec des gains similaires. On obtient, par exemple, entre 30 et 40% de couple supplémentaire à très bas régime. Le concept du downsizing est également analysé dans le cas de petites cylindrées afin d'identifier son potentiel ultime.

- la mise au point de nouveaux processus de combustion : A ce titre, grâce à sa double expertise dans les moteurs et carburants, l'IFP participe à deux partenariats internationaux organisés en vue de la mise au point de nouveaux modes de combustion, le Consortium international Diesel HCCI (Homogeneous

charge compression ignition) et le Consortium international Essence CAI (Controlled Auto-Ignition). Les travaux conduits dans ce cadre visent notamment à s'assurer de l'adéquation (maîtrise des interactions physico-chimiques) entre ces nouvelles technologies moteur et les carburants disponibles actuellement, qu'ils soient d'origine pétrolière ou carburants alternatifs (issus du gaz ou de la biomasse). Une partie de ces travaux axés sur la combustion est opérée en collaboration avec PSA Peugeot Citroën et Renault au sein du Groupement scientifique moteurs (GSM). La position de leader de l'IFP dans ces domaines de recherche repose en particulier sur les compétences poussées qu'il détient en matière de modélisation du groupe motopropulseur.

L'action de recherche de l'IFP en matière d'amélioration des performances des moteurs conventionnels s'inscrit aujourd'hui dans un nouvel environnement en région lyonnaise avec la labellisation en 2005 par le Comité Interministériel pour l'Aménagement du territoire du pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck&Bus 2015¹ ». Un des projets de R&D de ce pôle de compétitivité concerne en effet l'ensemble « Motorisation et chaîne cinématique » avec notamment comme

¹ Avec l'appui du Grand Lyon et de la CCI de Lyon, l'association Lyon Urban Truck&Bus 2015 été créée à l'initiative de Renault Trucks, Irisbus France, l'Institut Français du Pétrole (IFP), l'Institut National pour la Recherche dans les Transports et leur Sécurité (INRETS). L'ambition de Lyon Urban Truck & Bus 2015 est de répondre aux défis soulevés par la croissance des besoins de mobilité, des personnes et des marchandises dans un environnement urbain. Il s'agit de travailler sur le camion et le bus urbain afin de promouvoir des systèmes de transports urbains plus économes, plus sûrs, plus propres, plus fiables et mieux intégrés dans leur environnement.

objectif l'optimisation des moteurs thermiques (diesel, allumage commandé...).

⇒ *La motorisation hybride, autre enjeu de recherche pour l'IFP et « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »*

L'IFP travaille plusieurs approches couvrant les différents niveaux d'hybridation envisageables sur un véhicule (système Stop & Start, récupération d'énergie au freinage...). Une première démarche porte sur la conception et l'architecture des moteurs thermiques afin d'optimiser leurs performances dans le contexte d'une application hybride. L'IFP développe également des stratégies de contrôle innovantes visant à optimiser le fonctionnement du moteur et la gestion de l'énergie à bord du véhicule. Plusieurs projets d'application sont envisagés. L'un d'entre eux porte sur le développement d'un démonstrateur hybride sur la base d'un véhicule automobile à vocation urbaine alimenté au gaz naturel. Une première démonstration réalisée (en collaboration avec Gaz de France) avec un véhicule de série Toyota Prius full hybrid adapté au gaz naturel a d'ailleurs permis d'atteindre des gains de consommation records au dernier Challenge Bibendum : 3,56 kg de GNV pour 144 km, soit l'équivalent d'une consommation de 3,63 litres d'essence au 100 km. Ce véhicule présente ainsi un niveau d'émissions de CO₂ particulièrement réduit : moins de 85 g/km sur cycle normalisé.

Le développement de différentes motorisations hybrides constitue par ailleurs le deuxième objectif du projet de R&D « Motorisation et chaîne cinématique » du pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck&Bus 2015 ».

⇒ *Les véhicules de transports collectifs urbains de demain, l'un des horizons de projet de « Lyon Urban Truck&Bus 2015 »*

L'un des enjeux que cherche à relever le pôle de compétitivité lyonnais réside dans la mise au point de véhicules de transports collectifs urbains hautement performants, c'est à dire susceptibles de prendre en charge une part croissante des déplacements de personnes en milieu urbain. Pour ce faire l'un des projets de R&D porte sur l'amélioration de l'architecture et du confort des véhicules. Ce volet articule trois axes de travail :

- Technologies : structure véhicules, nouveaux matériaux, intégration des motorisations hybrides, nouveaux concepts ;
- Performances du système : amélioration des prestations véhicules, optimisation du rendement des chaînes de traction, optimisation des consommations globales du système ;
- Prestations : allègement, traitement des vibrations et du bruit, accessibilité, nouvelles architectures innovantes.

Outre l'IFP, le pôle de compétitivité « Lyon Urban Truck&Bus 2015 » compte la participation de deux autres centres de recherche d'envergure en matière de transports.

- L'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (l'INRETS) : créé par décret interministériel du 18 septembre 1985, l'INRETS a pour mission d'effectuer ou d'évaluer toutes les recherches et tous les développements technologiques consacrés à l'amélioration pour la collectivité, des systèmes et moyens de transports et de circulation du point de vue technique, économique et social. Le Comité Interministériel d'Aménagement et de Compétitivité des Territoires (CIACT) a entériné le 14 octobre 2005 le déménagement de l'INRETS sur le site de Lyon-Bron, où sont

déjà implantés cinq de ses laboratoires. D'ici à la fin 2008, la Direction générale et le Secrétariat général de l'Institut prendront leur place au sein d'un nouveau bâtiment. L'activité scientifique de l'INRETS est organisée en trois axes : Accroître la sécurité des personnes ; Optimiser l'usage des réseaux de transport ; Accroître la fiabilité et la durabilité des systèmes de transport, optimiser leur consommation énergétique et réduire leur impact sur l'environnement.

- Le Laboratoire d'Economie des Transports : équipe pluridisciplinaire créée il y a 30 ans et regroupant aujourd'hui une soixantaine de personnes, le LET est la principale équipe de recherche française dans son domaine. L'une des spécificités du laboratoire réside dans son double ancrage académique et sectoriel. A la production scientifique traditionnelle des équipes de recherche s'ajoutent des activités contractuelles et d'expertise contribuant à l'aide à la décision des pouvoirs publics. Les axes de recherche du LET répondent aux principaux enjeux du champ de recherche largement déployé à l'échelle internationale sous le vocable de « Transportation science ». Généralement liés à des contrats de recherche, ces axes sont les suivants : Marchés, organisations et systèmes d'incitations (calcul économique ; évaluation, tarification et financement des infrastructures de transport...) ; Mobilité et usages de l'espace et du temps (budgets temps ; accessibilité et politique de mobilité durable ; localisation des activités et formes urbaines...) ; Modélisation et simulation de la mobilité des personnes et des marchandises (modélisation des déplacements

de marchandises en ville ; simulation et prospective de la mobilité urbaine des personnes...).

⇒ *La promotion des modes de transports*

« doux », l'initiative « Vélo'v » du Grand Lyon

Favoriser les déplacements urbains à vélo passe notamment par une action spécifique concernant l'accès aux vélos eux-mêmes. En la matière, plusieurs villes françaises, Rennes, La Rochelle et Strasbourg, se sont lancées dès les années 1990 dans la mise à disposition de bicyclettes pour circuler en ville. Toutefois, des recherches (INRETS, 2003) ont montré que ces expériences se révélaient trop modestes pour que leur impact soit sensible en termes de report modal. De ce point de vue, les politiques conduites dans d'autres pays européens tels que les Pays-Bas, l'Allemagne ou la Suisse, apparaissent plus volontaristes, avec des résultats significatifs à la clef.

Ainsi, depuis mai 2005, l'agglomération lyonnaise, à l'initiative de la communauté urbaine, est passée à la vitesse supérieure et s'est engagée dans la mise en place progressive d'un dispositif de mise à disposition de vélo en libre-service. Baptisé Vélo'v et gérée par la société JCDecaux dans le cadre du marché d'exploitation et de renouvellement du mobilier urbain que lui a confié le Grand Lyon en 2004, cette démarche se veut résolument ambitieuse et innovante. Elle propose actuellement 3 000 vélos répartis sur 250 stations, lesquelles ont été implantées sur les communes de Lyon et Villeurbanne à proximité des gares et transports en commun et de telle sorte qu'il y ait une station vélo tous les 300 mètres en moyenne et à moins de 5 minutes à pied l'une de l'autre. En 2007, l'offre sera encore étendue pour atteindre 4 000 vélos répartis sur 340 stations (Grand Lyon, 2007). L'accès aux

vélos s'effectue grâce à une carte d'abonnement de courte ou de longue durée – la première est disponible directement dans les bornes électroniques de chaque station, la seconde via une inscription sur Internet – selon le principe que le service ne devient payant qu'au delà d'une demi-heure d'utilisation. Sur un plan technique, les vélos proposés se distinguent par leur robustesse et leur simplicité. Conçus par la vénérable entreprise stéphanoise « Cycle Mercier »¹, ils sont notamment équipés de moyeu à vitesses intégrées (3 vitesses, ni dérailleur, ni pignons). Le succès du dispositif Vélo'v est incontestable. Après une première année pleine de fonctionnement en 2006, il s'est définitivement imposé comme un véritable moyen de transport collectif individuel : 487 024 cartes courte durée ont été achetées ; 5 520 000 locations ont été effectuées soit une moyenne de 15 123 locations par jour ; 11 300 000 kms ont été parcourus soit 283 fois le tour de la terre ou 5 000 kms par vélo. Cette initiative ne cesse de séduire de nouvelles agglomérations, Marseille, Aix-en-Provence et Bruxelles s'étant depuis engagé à en faire bénéficier leur territoire (mavilleavelo, 2007).

Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur du bâtiment

⇒ *Les laboratoires de recherches lyonnais soutenus par le PREBAT*

¹ La marque des cycles Mercier fut fondée à Saint-Étienne par Émile Mercier (1899-1973). La marque se dote d'une équipe cycliste professionnelle dès 1920. Mercier reste en compétition jusqu'en 1984, date du dépôt de bilan. Les salariés reprennent l'entreprise en 1985. C'est le renouveau qui s'appuie sur la grande distribution, délaissant les réseaux classiques des petits revendeurs. La production annuelle pour 2005 est d'environ 120 000 bicyclettes (également sous la marque Poulidor), dont 1 200 pour l'opération vélo'v (Wikipedia, 2006).

En région lyonnaise, cinq organismes ont vu leurs projets de recherche trouver le soutien du Programme de recherche et d'expérimentation sur l'énergie dans le bâtiment¹ (PREBAT) initié en 2002 par le Plan Urbanisme Construction Architecture (Ministère de l'équipement).

- Le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT): créé en 1960 et situé à Villeurbanne, sur le Domaine Scientifique de La Doua, le CETIAT est un laboratoire d'études, d'essais et d'étalonnages dans les domaines de l'aérodynamique, de la thermique et de l'acoustique doté de 80 ingénieurs et techniciens. Il réalise chaque année un programme d'études collectives pour ses partenaires, dont les grandes orientations pour la période 2004-2007 sont : Normalisation, réglementation, certification ; Recherche et développements collectifs ; Métrologie ; Transfert et diffusion des connaissances. Les projets de R&D du CETIAT soutenus par le PREBAT concernent la qualité de l'air intérieur – projet « Caractérisation des capteurs utilisés

en modulation de débit » (appel à projets 2004) – l'efficacité énergétique et la fiabilité des systèmes de ventilation des locaux – projet « Diagnostic des systèmes de ventilation » (appel à projets 2002) – et la maîtrise de la demande d'électricité – projet « Affichage Energétique de la Ventilation » (appel à projets 2003).

- Le Laboratoire des Sciences de l'Habitat (LASH) de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE) : Situé dans les locaux de l'ENTPE à Vaulx-en-Velin, le LASH conduit depuis plusieurs années un programme de recherche, d'études et de formation supérieure portant sur la « physique du bâtiment ». Les recherches développées sont centrées sur l'acoustique, la lumière ainsi que sur les systèmes thermiques et aérodynamiques. Dans le cadre de l'appel à projets 2002, le PREBAT a sélectionné le projet de recherche « Optimisation de l'usage de conduits de lumière naturelle » du LASH. Ce projet répondant au concept d'architecture bioclimatique vise à développer des solutions techniques pour assurer l'éclairage naturel des zones situées loin de l'enveloppe des bâtiments.

- Elyo Cylergie : basé à Ecully, Elyo Cylergie est le centre de R&D d'Elyo, société de services en efficacité énergétique et environnementale intégrée au groupe SUEZ Energie Services. Les projets de R&D d'Elyo Cylergie soutenus par le PREBAT concernent la gestion et le contrôle des performances des systèmes énergétiques des bâtiments au cours du temps (appel à projets 2002), ainsi que la modulation des débits des systèmes de

¹ Les finalités du PREBAT sont de développer la recherche, le transfert des technologies et l'expérimentation selon trois axes stratégiques. La modernisation durable des bâtiments existants : l'objectif de recherche et de développement poursuivi est d'obtenir, à l'horizon 2015-2020, dans des conditions techniques, économiques et sociales acceptables, des solutions techniques permettant la rénovation banalisée de bâtiments avec une performance énergétique aussi proche que possible de celle des bâtiments neufs. La préfiguration des bâtiments neufs de demain : l'objectif de recherche et de développement poursuivi est de permettre à l'horizon 2015- 2020 la construction banalisée de bâtiments de tous types très performants au plan énergétique. L'émergence de bâtiments à énergie positive : l'objectif de recherche et de développement poursuivi est de pouvoir construire et rénover dès que possible une part importante des bâtiments pouvant fournir plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Une part significative des bâtiments réhabilités devra pouvoir bénéficier des méthodes et des techniques mises au point.

renouvellement de l'air intérieur (appel à projets 2003).

- ALDES : Entreprise d'envergure mondiale spécialisée dans le traitement de la qualité de l'air dans les bâtiments et dont le siège social est situé à Vénissieux, ALDES propose des solutions innovantes dans 5 secteurs spécifiques : ventilation ; aspiration centralisée ; diffusion et distribution d'air ; protection incendie ; acoustique. Les deux projets de R&D d'ALDES récemment soutenu par le PREBAT portent sur la ventilation des locaux : projet « Système de ventilation basse consommation destiné au collectif et au tertiaire » (appel à projets 2002), projet « Système de ventilation préchauffage rafraîchissement hybride pour la maison individuelle » (appel à projets 2004).

- Ingélux consultants : cabinet de conseil dont le siège social est localisé à Vaulx en Velin, Ingélux a pour mission de conduire, sur le plan opérationnel, des missions en éclairage valorisant les développements réalisés à l'ENTPE. Il participe à ce titre au projet « Optimisation de l'usage de conduits de lumière naturelle » du LASH. Ingélux a obtenu par ailleurs le soutien du PREBAT pour deux projets de recherche en matière de maîtrise de la demande d'électricité : « Eclairage de postes de travail à très hautes performances visuelles et énergétiques » (appel à projets 2003) ; « Délestage électrique partiel en éclairage » (appel à projets 2004).

Outre ces organismes dont l'action de recherche s'inscrit dans le cadre du PREBAT, il faut souligner la présence en région lyonnaise d'un autre acteur important, celle du Centre de thermique de Lyon

(CETHIL). Situé lui aussi sur le campus de la Doua à Villeurbanne puisque rattaché à l'Institut national des sciences appliquées (INSA), le CETHIL conduit des recherches couvrant des domaines très variés de la thermique et de l'énergétique. C'est l'un des seuls laboratoires nationaux et internationaux qui traite en continu une gamme aussi étendue d'échelles de longueurs et de températures : de la nanostructure au bâtiment, du coulis de glace à la combustion. Deux de ses axes de recherche concernent spécifiquement la question des performances énergétiques du bâtiment : Énergétique des Systèmes Solaires (études menées sur les concepts bioclimatiques notamment) ; Thermo-Aérodynamique des Bâtiments (modélisation, simulation numérique et validation expérimentale des transferts thermiques, aérodynamiques et hydriques liés à l'objet « Bâtiment »).

⇒ *Le MAT'Electrique, promoteur de l'innovation pour l'électricité et la lumière*

Le MAT'Electrique est une vitrine technologique dédiée au confort électrique qui appartient au groupe régional Sonepar Sud-Est. Créée en 1990, elle a pour objectifs de faire découvrir, promouvoir, valoriser la filière électrique et fédérer ses acteurs.

Le MAT'Electrique est un concept unique en Europe : un centre de 4 000 m² implanté au cœur de Lyon, conçu à l'image des « markets centers » (centres d'affaires) américains qui regroupe en un même lieu tous les produits relatifs à l'éclairage, la climatique, l'appareillage et la domotique. Le MAT'Electrique réunit ainsi un large éventail de professionnels à la pointe de leur domaine, qui peuvent louer des espaces afin d'exposer leurs produits et proposer des solutions concrètes. Par ailleurs, le grand public, c'est à dire les acteurs professionnels du marché, architectes d'intérieur et

d'extérieur, promoteurs, concepteurs lumières, designers mais aussi les particuliers, peuvent y bénéficier de conseils spécialisés. Au total plus de 50 fabricants sont représentés au MAT'Electrique à travers des espaces de marques constructeurs mais également des espaces spécialisés tels que EUROPA dédié à l'éclairage, CLIMATIC réservé aux produits de chauffage et de climatisation, DOMOSIC consacré à la domotique, et BIEN-ETRE où EDF présente ses normes, labels et tarifications. Outre ce rôle de vitrine technologique, le MAT'Electrique se revendique porteur de la promotion et de la valorisation de la filière électrique, mais aussi d'innovation. Il est l'un des trois membres fondateurs de la fête des Lumières, avec la Ville de Lyon et EDF Service Métropole. Il a également initié le programme d'étude QELE (Qualité Environnementale des Locaux d'Enseignement), en partenariat avec la région Rhône-Alpes. Il décerne aussi chaque année les MAT d'or, qui récompensent les trois meilleurs produits électriques distribués par Sonepar Sud-Est.

Les technologies d'économie d'énergie dans le secteur de l'industrie

Les économies d'énergie dans l'industrie chimique constituent l'un des projets retenus dans le cadre d'Axelera¹, pôle de compétitivité lyonnais à vocation

¹ Avec l'appui du Grand Lyon et de la CCI de Lyon, l'association AXELERA a été créée par les membres fondateurs du pôle, Arkema, CNRS, IFP, Rhodia et Suez, pour porter le projet « Pôle de compétitivité Chimie-Environnement Lyon Rhône-Alpes » labellisé en 2005. Ce projet vise à élaborer des programmes de recherche innovants pour le développement d'une chimie plus dynamique, plus compétitive et encore plus respectueuse de l'environnement. Les projets de coopération réunissent autour de thématiques clefs industrie, formation et recherche académique. Les grands thèmes identifiés portent sur la catalyse, les procédés et les matériaux.

mondiale sur le secteur Chimie-environnement. Piloté par l'IFP, l'un des principaux partenaires d'Axelera, le projet « Intensification des procédés » a pour objectif la réduction de la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement des réacteurs chimiques. Il repose sur plusieurs axes de recherches :

- Mise au point de microréacteurs aptes à un fonctionnement en production de masse dans les usines chimiques ;
- Détermination des conditions optimales de fonctionnement de ces réacteurs ;
- Détermination des conditions optimales de fabrication (dépôt de catalyseur, soudures) ;
- Optimisation du couple réacteurs-réactions chimique ;
- Mise au point des processus industriels permettant la mise en œuvre et le contrôle amélioré des réacteurs (notamment les périphériques : systèmes de contrôle, systèmes d'alimentation...).

Les acteurs lyonnais des technologies énergétiques faiblement émettrices de dioxyde de carbone

Les technologies énergétiques alternatives aux hydrocarbures et aux moteurs à explosion

⇒ *Les biocarburants, autre axe majeur des recherches conduites par l'Institut Français du Pétrole*

L'IFP travaille depuis 1980 dans le domaine des biocarburants avec, en particulier, la mise au point au début des années 1990 du procédé Esterfip de production de biodiesel à partir d'huile de colza et de méthanol par catalyse homogène. Depuis, L'IFP

a développé un nouveau procédé de production de biodiesel par catalyse hétérogène Esterfip-H. Cette nouvelle génération conduit à des performances améliorées, avec un biodiesel de meilleure qualité et moins de sous-produits. Une première génération du catalyseur correspondant ayant été industrialisée en 2005, le procédé Esterfip-H, commercialisé par Axens, sera mis en oeuvre en 2006 par la société Sofiproteol à Sète, ce qui constitue une première industrielle mondiale. Les objectifs des travaux de R&D en cours visent la réduction des coûts et le développement de nouveaux procédés pour la valorisation du glycérol (sous-produit de la réaction).

Par ailleurs, l'IFP cherche à développer de nouvelles filières énergétiques par conversion de biomasse lignocellulosique d'origines forestière et agricole (bois, paille, cultures dédiées, déchets végétaux, etc.) de manière à accéder à une ressource moins limitée, qui n'entre pas en concurrence avec l'usage alimentaire. Pour cela, l'IFP étudie les transformations facilitant le transport de la biomasse, parmi lesquelles la pyrolyse rapide ou la torréfaction. Dans ce domaine, une attention particulière est portée à la caractérisation fine des produits qui en sont issus dans la perspective de leurs utilisations (biocarburants, charges d'unités de raffinage ou de gazéification). L'IFP étudie également la mise au point d'une technologie de gazéification pour la production de gaz de synthèse, à partir de laquelle des carburants de synthèse Fischer-Tropsch ou de l'hydrogène seront produits. Le développement d'un procédé de production à haut rendement de bioéthanol à partir de lignocellulose est également à l'ordre du jour avec, en 2005, le démarrage du projet européen Nile (New improvements for lignocellulosic ethanol) que

l'IFP coordonne. Il vise à mettre au point de nouvelles technologies pour une conversion efficace de la lignocellulose en éthanol avec validation de ces technologies dans un pilote et estimations technico-économiques et environnementales. D'une durée de quatre ans, ce projet intégré rassemble une vingtaine de partenaires. Il bénéficie également du soutien de l'Agence Nationale de la Recherche.

⇒ *Les biocarburants, objet de recherche du centre de recherche de Total*

Situé à Solaize, le centre de recherche de Total s'appuie sur une équipe de 230 personnes. Le développement et l'amélioration des performances des biocarburants figurent parmi ses axes de travail.

Les technologies de production de chaleur à partir des énergies renouvelables

La région lyonnaise possède une capacité de recherche sur le secteur spécifique de la géothermie. Outre ses recherches portant sur les systèmes de ventilation, évoquées dans le point concerne les économies d'énergie dans le bâtiment, le Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT) conduit des travaux en matière de géothermie. Ceux-ci portent plus spécifiquement sur la mise au point de pompes à chaleur. Deux projets de recherche ont ainsi trouvé le soutien du PREBAT : « Méthodes d'essais des pompes à chaleur de type sol eau » (appel à projets 2002) et « Méthodes d'essais pour la caractérisation des performances des pompes à chaleur de type sol-eau et sol-sol » (appel à projet 2003).

Les technologies de l'énergie nucléaire

La filière Nucléaire est fortement représentée sur la région lyonnaise qui dispose d'importantes capacités d'ingénierie et de R&D. Elle compte en effet trois implantations importantes d'EDF :

- EDF SEPTEN (Service d'Etudes et de Projets Thermiques et Nucléaires) : il développe les projets des futures centrales nucléaires en relation avec le CEA.
- EDF UNIPE : c'est un spécialiste des équipements nucléaires et de la maintenance.
- EDF CIDEN (Centre d'Ingénierie Déconstruction Environnement) : spécialiste de la maîtrise d'ouvrage des centrales en fin de vie.

La région lyonnaise possède par ailleurs un centre de recherche public dédié à l'atome : l'Institut de Physique Nucléaire de Lyon. Situé sur le campus de La Doua à Villeurbanne et comptant une équipe de recherche de 200 personnes environ, l'IPNL poursuit des travaux dans plusieurs directions. Deux axes intéressent directement la filière électronucléaire : l'étude de la matière nucléaire chaude ; et surtout l'étude de l'aval du cycle du combustible. Les recherches concernant ce deuxième axe sont effectuées dans le cadre du Programme sur l'Aval du Cycle Electronucléaire (PACE) du CNRS avec pour principaux partenaires industriels l'ANDRA, EDF et le CEA. Les résultats obtenus sont périodiquement présentés et discutés devant la communauté scientifique. Les principales thématiques développées concernent le stockage des déchets nucléaires et les réacteurs nucléaires du futur (Génération IV). Centré sur l'analyse des processus de transport des produits de fission et des actinides (généralement simulés par des isotopes non radioactifs) au sein de différents

matériaux de confinement du combustible ou des déchets, ces travaux apportent une contribution à l'évaluation de la sûreté des assemblages de combustibles et du stockage des déchets nucléaires.

Fort de ses deux sites de production de Bugey et de Saint-Alban, la région lyonnaise constitue plus largement un territoire majeur de production de la filière électronucléaire française. Ces deux sites font en effet l'objet d'activités de maintenance et d'amélioration conduites par le leader mondial de l'énergie nucléaire, AREVA. Sans équivalent en Europe, le pôle nucléaire lyonnais compte par ailleurs la présence de plusieurs sous-traitants d'importances :

- ROBATEL : fondée en 1830 et localisée à Genas, la société ROBATEL est spécialisée dans la fabrication d'emballages de transport et de stockage de matières radioactives, de cellules blindées, de gants, de protections d'irradiateurs, de protections neutroniques...
- REEL : située à St-Cyr-au-Mont-d'Or, REEL est une société dont l'activité porte sur la conception, la fabrication, l'installation et la maintenance d'équipements spéciaux de manutention. L'un des domaines d'application des technologies proposées est le nucléaire
- VELAN SA. : localisée à Lyon, VELAN est l'un des principaux fournisseurs mondiaux de robinetterie dans les domaines : de l'énergie nucléaire et conventionnelle, de la cryogénie, des gaz liquéfiés, de la marine et des vannes pour applications spécifiques. Ainsi, plus de 300 centrales nucléaires dans le monde ont choisi VELAN pour leur équipement en vannes. Cette société est par ailleurs l'un des seuls robinetiers qualifiés pour les vannes tritium

dans le cadre des programmes de recherche sur la fusion.

- G.A.D.S. : implanté au sein du Parc Industriel de la Plaine de l'Ain, G.A.D.S. est l'une des filiales d'AREVA dédiées à l'assainissement radioactif et aux activités annexes (petits démantèlements, logistique nucléaire, maintenance et nettoyage industriel).

Les technologies de production d'électricité à partir des énergies renouvelables

Outre la production de chaleur, la production d'électricité constitue un autre terrain de recherche prometteur pour la région lyonnaise pour ce qui concerne les énergies renouvelables. La recherche se concentre plus précisément sur le solaire photovoltaïque.

En la matière, on retrouve deux organismes de recherche conduisant par ailleurs des travaux portant sur les économies d'énergie dans le bâtiment : Ingelux dont un projet d'éclairage grâce à l'électricité photovoltaïque a trouvé le soutien du PREBAT dans le cadre de l'appel à projet 2004 – « Développement de systèmes d'éclairage photovoltaïque sans batterie pour usage diurne dans les locaux aveugles » – et le Centre de thermique de Lyon (CETHIL) dont les travaux sur l'Énergétique des systèmes solaires vise notamment la définition de nouveaux concepts de composants multifonctionnels co-(tri-)générateurs d'énergie (chaleur, électricité, froid). A ces deux centres de recherche il faut ajouter le Laboratoire de Physique de la Matière de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, dont un des axes de recherche porte sur l'énergie photovoltaïque.

Surtout, la région lyonnaise compte deux des principaux acteurs français de l'industrie photovoltaïque :

- Photowatt : fondé en 1979 et installé à Bourgoin-Jallieu en Isère, Photowatt est le premier fabricant français de plaques, cellules et modules photovoltaïques. De renommée mondiale et comptant 25 années d'expérience, cette société emploie 560 personnes dont 20 pour la R&D. Verticalement intégrée, Photowatt produit à partir du silicium les lingots qui lui permettront de réaliser les plaques, les cellules et les modules polycristallins. La R&D est au cœur de la stratégie de développement de la société dans la mesure où l'amélioration du rendement de conversion des produits, la multiplication des applications du photovoltaïque et la baisse des coûts de production constituent les facteurs majeurs de la compétitivité dans ce secteur. C'est dans cette optique que Photowatt travaille activement sur le développement d'une nouvelle technologie révolutionnaire à base de microbilles de silicium permettant l'utilisation de systèmes flexibles sur des surfaces non encore exploitées.

- Tenesol : Créée en 1983 et détenue à parité par Total et EDF (50/50) depuis mai 2005 (rebaptisée Tenesol à cette occasion), la société est le 1^{er} assembleur mondial de systèmes photovoltaïques. Situé sur la commune de La-Tour-de-Salvagny, Tenesol comprend une équipe de R&D d'une vingtaine de personnes et a pour vocation la conception, l'installation et le suivi d'équipements photovoltaïques. La société conçoit des systèmes sur mesure, et, depuis 1999, fabrique

ses propres panneaux solaires. Les panneaux photovoltaïques fabriqués par Tenesol sont principalement destinés à l'habillage de toits en Europe. La production de la société devrait permettre d'équiper les toits de 2500 foyers européens par an. Présent sur quatre continents, Tenesol a réalisé plusieurs dizaines de milliers d'installations solaires.

Photowatt et Tenesol sont parmi les principaux partenaires composant le pôle de compétitivité rhonalpin TENERDIS (Technologies Energies Renouvelables Rhône-Alpes Drome Isère Savoie). TENERDIS a pour objectif de développer la production d'énergies renouvelables (solaire, biomasse, hydraulique) et d'assurer leur transformation sur des vecteurs d'énergie actuels et futurs (électricité, chaleur et hydrogène). Le volet concernant l'énergie solaire s'appuie notamment sur la création en 2005 de l'Institut National de l'Energie Solaire (INES) sur le site de Technolac en Savoie.

L'industrie photovoltaïque lyonnaise comprend par ailleurs un tissu de PME spécialisées : IMERYS TC (conception et fabrication de toitures intégrant des panneaux solaires) et SOLARFORCE (création et vente de produits pour la production d'énergie photovoltaïque) à Limonest, SOLARCOM à Saint-Fons (fabrication de matériels électroniques et de systèmes photovoltaïques), TRANE (matériel de conditionnement air, réfrigération, climatisation. Fabrication et distribution de matériels photovoltaïques) à Dardilly, TRYBASOLAR (fabrication de chaudières à gaz et à granulés, et de capteurs solaires) à Lyon.

Les acteurs lyonnais des technologies de séquestration du dioxyde de carbone

La région lyonnaise est bien placée s'agissant du développement des technologies du captage, du transport et du stockage du CO₂. L'Institut Français du Pétrole est un chef de file important dans ce domaine au niveau européen, les compétences nécessaires au développement de la séquestration étant celles mises en oeuvre dans le cadre de l'exploitation pétrolière.

Les technologies du captage du dioxyde de carbone

⇒ *Le projet européen Inca-CO₂ de coordination de recherches piloté par l'IFP*

Soutenu notamment par le 6^{ème} Programme cadre européen de R&D (PCRD), le projet Inca-CO₂ a pour objectif de positionner, sur le plan international, le savoir-faire européen dans le domaine du captage et du stockage du CO₂. Ce projet réunit, depuis 2005, autour de l'IFP, 6 centres de recherche européens, BGS (Grande-Bretagne), BRGM (France), GEUS (Danemark), OGS (Italie), Sintef (Norvège) et TNO (Hollande) ainsi que 4 partenaires industriels majeurs, Alstom, BP, Statoil et Vattenfall (premier groupe suédois d'électricité très fortement implanté en Allemagne). Ce groupe constitue une structure de coopération, de concertation et d'échanges sur laquelle va s'appuyer la Commission Européenne dans ses négociations internationales. Plusieurs axes seront parallèlement développés : identifier les possibilités de coopération futures entre l'Europe et ses partenaires internationaux (Australie, Canada,

États-Unis et Japon), fournir toutes les informations utiles aux représentants européens siégeant dans les organisations internationales comme le CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum) et dégager une vue cohérente sur l'activité internationale relative au domaine du captage et du stockage du CO₂, afin de promouvoir les politiques européennes à venir.

⇒ *Le programme européen intégré CASTOR piloté par l'IFP*

Dans le cadre du 6^{ème} Programme cadre européen de R&D, l'Institut Français du Pétrole a été désigné pilote du programme de recherche CASTOR (du captage au stockage du CO₂). Planifié sur 4 ans (février 2004/février 2008), ce projet vise le développement et la validation, grâce aux travaux conjoints entre industriels et organismes de recherche publics acteurs du projet, d'une partie importante des technologies innovantes nécessaires au captage du CO₂ dans les fumées industrielles, et à son stockage géologique. Le projet CASTOR vise plus spécifiquement à permettre le captage et le stockage de 10% des émissions de CO₂ en Europe, soit environ 30% du CO₂ émis par les centrales électriques et les industries européennes. Les principaux objectifs du projet Castor sont les suivants :

- réduction importante des coûts de captage postcombustion (de 50-60€ à 20-30 € par tonne de CO₂). Le défi réside notamment dans l'extraction du CO₂, dilué dans un gros volume de fumées, à faible pression. Les différents procédés envisageables sont testés dans une installation pilote, en aval de la centrale à charbon de 400 000 kW d'Esbjerg (Jutland, Danemark), exploitée par la société ELSAM ;

- meilleure acceptation du concept de stockage géologique, en termes de capacité, de fiabilité, de durée et de sécurité ;
- élaboration d'une stratégie intégrée européenne englobant le captage, le transport et le stockage du CO₂.

⇒ *Les autres programmes de recherche sur le captage auxquels participe l'IFP*

Les voies alternatives de captage à l'étude sont davantage adaptées à de nouvelles installations industrielles. L'IFP est ainsi impliqué dans plusieurs autres programmes de recherche européens.

- ENCAP : ce projet piloté par la société suédoise Vattenfall vise le développement de procédés de capture « pré-combustion » et « oxycombustion » du CO₂ pour les systèmes de production d'électricité, à partir de différents combustibles (charbon, gaz naturel ou combustibles pétroliers).
- HYPOGEN : lancé en 2004, ce projet vise à développer, sur dix ans, un démonstrateur de production d'électricité à partir de gaz naturel avec captage amont (séparation de l'hydrogène et du carbone) et stockage du CO₂.

⇒ *Les projets de R&D du pôle de compétitivité lyonnais Axelera concernant la filière de la séquestration du CO₂*

Un premier projet concerne la thématique « Maîtrise et évaluation de l'efficacité environnementale ». Piloté par Elyo Centre-Est Méditerranée, ce projet s'inscrit dans le contexte de sévèrisation des contraintes environnementales, notamment en matière de pollution atmosphérique. Il vise à améliorer la maîtrise de la nature et de la quantité de polluants rejetés par les gaz de combustion dans l'atmosphère. Centré sur la question spécifique des bilans environnementaux des procédés de

l'industrie chimique, ce projet poursuit plusieurs objectifs :

- recenser les contraintes réglementaires applicables aujourd'hui et extrapolables à court et à moyen terme, sur le plan régional, national et européen ;
- sur le plan international, faire l'inventaire des publications, brevets et bonnes pratiques en matière d'outils et de méthodes de mesure et de suivi industriel des émissions, recenser les systèmes de mesures automatiques existants et leurs modes d'installation, de calibrage, de maintenance et d'exploitation, passer en revue les services associés ;
- tester sur site et qualifier les techniques nouvelles prometteuses disponibles ;
- identifier les manques, proposer des solutions en terme d'outils et de méthodes pour les combler, élaborer un guide de recommandations ;
- Proposer un outil de mise à disposition des données d'émissions au grand public sur Internet ;
- Etablir un guide de recommandations en terme de mesures primaires et de traitement des fumées en fonction du processus de combustion concerné ;
- Développer des outils de mesure et des outils d'action sur les procédés.

Un autre projet, intitulé « Capture des gaz » et piloté par l'IFP, traite des deux principales étapes opérationnelles de séquestration du CO₂ : captage et stockage. Ses objectifs généraux sont : l'évaluation de solutions pour un stockage géologique du CO₂ ; la réduction des coûts de capture et de concentration du CO₂.

Les technologies du stockage géologique du dioxyde de carbone

⇒ *Le projet CO2GeoNet de coordination des recherches au niveau européen auquel participe l'IFP*

Il s'agit d'un réseau thématique européen visant à élaborer une réflexion commune et à promouvoir le stockage du CO₂. Coordonné par le British Geological Survey, ce réseau regroupe une soixantaine de membres en provenance de 15 pays européens. Plusieurs objectifs ont été définis pour la période de cinq ans durant laquelle l'UE finance son intégration :

- Maintenir le cap sur sa lancée et conserver à l'Europe la place de leader qu'elle a en matière de stockage géologique du CO₂ et projeter cette avance dans l'arène internationale ;
- Améliorer l'efficacité par l'harmonisation des programmes de recherche nationaux, la prévention des doublons en matière de recherche, et le partage des infrastructures et des droits de propriété intellectuelle existants et nouvellement acquis ;
- Identifier les écarts dans les connaissances et élaborer de nouveaux projets de recherche et des outils pour les combler. Chercher à obtenir des financements extérieurs venant de programmes nationaux ou industriels afin de diversifier, constituer et renforcer le portefeuille des activités de recherche partagées ;
- Fournir aux décideurs des informations techniques, impartiales et d'excellente qualité sur le stockage géologique du CO₂, et ce faisant attirer la confiance publique dans cette technologie, participer à l'élaboration de mesures, de règlements et de normes communes ;

- Assurer une formation pour soutenir les partenaires, intégrer de nouveaux membres dans le réseau et s'occuper de la relève des chercheurs pour l'avenir ;

- Exploiter les droits de propriété intellectuelle du réseau, aussi bien comme source de revenus pour soutenir le réseau que pour préparer l'industrie européenne à être compétitive sur les marchés mondiaux de l'énergie à faible émission de carbone.

⇒ *Le projet PICOREF coordonné par l'IFP*

Entre 2001 et 2005, le Réseau des Technologies pétrolières et gazières – réseau français associant des entreprises du secteur pétrolier et parapétrolier français, des centres de recherche et des universités (dont l'IFP et l'école des mines de Saint-Étienne) – a conduit le projet PICOR. Piloté par l'IFP, ce projet a permis de faire le point des connaissances et des outils pour les industries d'extraction pétrolière et de stockage souterrain. L'année 2005 est une année de transition entre cette recherche de base et son application à des projets industriels. Lancé pour deux ans, le nouveau projet PICOREF vise désormais à identifier des sites de piégeage du CO₂ dans le sous-sol français et de mettre au point une approche méthodologique dédiée à l'étude d'un site dans la mesure où seul un tel site permettra de faire la démonstration que le stockage se comporte comme le prédisent les modèles. Le secteur Sud-Est du bassin de Paris a été retenu pour cette investigation, car sa géologie est particulièrement bien connue grâce aux travaux pétroliers.

Les roches perméables dans lesquelles est envisagé le stockage du CO₂ contiennent soit de l'eau très salée, impropre à toute utilisation, soit des gisements d'hydrocarbures. PICOREF, aujourd'hui,

travaille sur les potentialités des deux options, dans la perspective d'ouvrir en France, à l'horizon 2010, un site d'expérimentation en vraie grandeur.

⇒ *Les autres programmes de recherche sur le stockage auxquels participe l'IFP*

L'IFP participe également à des programmes de recherche sur le stockage à l'échelle européenne.

- RECOPOL : Dans le cadre du 5^{ème} Programme cadre européen de R&D, ce projet, coordonné par la société néerlandaise TNO, vise à développer le premier pilote européen de démonstration de l'injection de CO₂ dans des veines charbon. Un site a été sélectionné dans le bassin de Silésie en Pologne. Plusieurs questions doivent ainsi être résolues : le stockage de CO₂ dans le charbon et la production simultanée de méthane sont-ils techniquement viables ? le stockage est-il stable et durable ? quelle est la production de méthane associée ? quels sont les critères à prendre en compte pour développer cette technologie dans d'autres bassins houillers ?

- ICBM : Coordonné par l'Imperial College de Londres, ce projet concerne le développement de technique de laboratoire et de caractérisation pour l'amélioration de la récupération de méthane par injection/séquestration de CO₂ dans les veines de charbon.

- CO₂STORE (anciennement SACS) : Coordonné par la compagnie pétrolière norvégienne Statoil, ce projet consiste à étudier l'opération industrielle de réinjection de CO₂ en provenance du gisement de gaz de Sleipner dans l'aquifère intermédiaire d'Utsira, situé à 1000 m de profondeur. Il s'agit de la première opération industrielle et expérimentale de

stockage géologique du CO₂ au monde. On y injecte 1 million de tonnes de CO₂ par an depuis 1996. L'objectif principal du projet est de démontrer la validité du concept de stockage de CO₂ en aquifère salin, de tester des méthodologies pour surveiller et prévoir la migration du CO₂, et enfin d'établir un guide de « bonnes pratiques » pour les futures opérations du même type.

ANNEXE :
**PROPOSITION DE HIÉRARCHIE DES AVANCÉES TECHNIQUES DANS LE DOMAINE DE L'ÉNERGIE
À L'ÉCHELLE MONDIALE ET À L'ÉCHELLE DE LA RÉGION LYONNAISE**

Pour embrasser d'un regard l'ensemble de l'histoire des techniques des transports et la participation de la région lyonnaise à celle-ci, il est apparu utile de tenter une hiérarchisation des avancées techniques majeures décrites dans la première partie de ce document.

Deux critères de choix complémentaires orientent la classification : portée de la rupture technique produite + ampleur de la diffusion dans les processus productifs, les pratiques quotidiennes...

On remarquera que bon nombre de ces avancées concernent les techniques de l'énergie avec lesquelles le système de transport entretient des relations étroites.

A l'échelle mondiale :

1. Domestication du feu (-500 000 ans)
2. Mise au point de la machine à vapeur (1700-1800)
3. Invention du moteur à explosion (1860-1864)
4. Invention du générateur électrique (1869-1873)
5. Première utilisation de la force animale pour le transport (-5000 ans avant JC)
6. Lampe électrique à incandescence (1878-1879)
7. Maîtrise de la réaction nucléaire (1900-1945)
8. Invention de la turbine hydraulique (1827)
9. Mise au point des premiers moulins à eau (-100 avant JC)
10. Première utilisation du vent pour la propulsion des bateaux (-3000 avant JC)

A l'échelle de la région lyonnaise :

1. Invention de la turbine hydraulique par l'ingénieur des mines stéphanois Benoît Fourneyron (1827)
2. Mise en service de la première usine hydroélectrique de France sur le site de Cusset à Villeurbanne, la plus puissante au monde à l'époque (1899)
3. Mise au point du réacteur nucléaire UNGG par le CEA de Grenoble (1950-1960)
4. Mise en service du plus puissant réacteur surgénérateur du monde, Superphénix à Creys-Malville (1986)
5. Première exploitation au monde de la houille blanche par Aristide Bergès et Jean-Baptiste Neyret à Lancey et Rioupérour en Isère (1862-1869)
6. La société lyonnaise « L'énergie industrielle » fondée par Pierre-Marie Durand devient un géant européen de la production et de la distribution d'électricité (1906-1946)

7. Mise en exploitation pionnière de mines de charbon dans la région stéphanoise (13^{ème} siècle)

8. La société d'éclairage au gaz de la ville de Lyon, créée en 1834 par Jules Renaux, devient la plus importante compagnie de distribution de gaz d'éclairage d'Europe (milieu du 19^{ème} siècle)

SOURCES

Le concept d'énergie

<http://www.cea.fr/jeunes>

Bobin J.L., Huffer E. et Nifenecker H. (sous la direction de)– L'énergie de demain. Techniques, environnement, économie – Les Ulis : EDP sciences, 2005

Wiesenfeld B. – L'énergie en 2050. Nouveaux défis et faux espoirs – Les Ulis : EDP sciences, 2005

Les tendances du secteur de l'énergie aujourd'hui / Les défis technologiques de l'avenir énergétique

<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?id=11433&m=3&cid=96>

<http://www2.equipement.gouv.fr/statistiques/backoffice/T/memento2004/bdiff19122006normalise/index.html>

<http://antoine-roussel.info/energie.html>

http://earthtrends.wri.org/pdf_library/data_tables/ene3_2005.pdf

http://earthtrends.wri.org/pdf_library/data_tables/ene2_2005.pdf

http://earthtrends.wri.org/pdf_library/data_tables/ene1_2005.pdf

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/facteur4-comprehension.htm>

<http://www.manicore.com/>

<http://www.mavilleavelo.com>

http://www.minefi.gouv.fr/themes/energie_mat_premieres/energie/index.htm

<http://www.x-environnement.org/jr/JR04/jancovici.html>

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie – Transports de marchandises, énergie, environnement et effet de serre – Paris, 2006

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie – Les véhicules particuliers en France. Données et références 2006 – Paris, 2006

Agence Internationale de l'Energie – Key world energy statistics 2006 – Paris, 2006

Agence Internationale de l'Energie – World energy outlook 2006 – Paris, 2006

Agence Internationale de l'Energie – World energy outlook 2004 – Paris, 2004

Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, Grand Lyon – Vers quels lendemains allons-nous? Prospective pour la métropole lyonnaise – Lyon, 2005

Assemblée nationale (Mission d'information sur l'effet de serre) – Rapport – Paris, 2006

Assemblée nationale – L'efficacité énergétique dans l'Union européenne – Paris, 2006

Assemblée nationale – Rapport d'information sur la politique de soutien au développement des énergies renouvelables – Paris, 2003

Barci Edwige, Bernusset Alexandre et Coulombel Nicolas – Marché des déplacements interrégionaux et internationaux de voyageurs. Concurrence TGV- avion – Paris, ENPC, 2004

BP – BP Statistical Review of World Energy 2006 – Londres, 2006

Bobin J.L., Huffer E. et Nifenecker H. – L'énergie dans le monde: bilan et perspectives – Les Ulis, EDP sciences, 2001

Bourg Dominique et Buclet Nicolas - L'économie de fonctionnalité. Changer la consommation dans le sens du développement durable – in Futuribles n°313 – Paris, 2005

Breton Tristan-Gaston, Kapferer Patricia – Renault Trucks – Paris, Le cherche midi, 2005

Chabanel Boris - Pour une planification territoriale métropolitaine. La démarche inter-Scot – Lyon : Université Lyon III, Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, 2004

Comité des constructeurs français d'automobiles – L'industrie automobile françaises. Analyses et statistiques 2006 – Paris, 2006

Commissariat général au plan – Transports urbains : quelles politiques pour demain ? – Paris, 2003

Commissariat à l'énergie atomique – Informations sur l'énergie 2005 – Paris, 2005

Conseil d'analyse stratégique (Commission « Energie ») – Rapport d'étape – Paris, Premier Ministre, 2006

Conseil d'analyse stratégique (Commission « Energie ») – Rapport du Groupe 1 « Enseignements du passé » – Paris, Premier Ministre, 2006

Conseil d'analyse stratégique (Commission « Energie ») – Rapport du Groupe 2 « Perspectives offre/demande » – Paris, Premier Ministre, 2006

Conseil économique et social – Recherches et technologies du futur : quelles orientations pour la production et la consommation d'énergie ? – Paris, 2006

Conseil économique et social – Une nouvelle dynamique pour le transport intermodal – Paris, 2006

Conseil général des Ponts et Chaussées – Comparaison européenne sur les mesures destinées à améliorer la performance énergétique des bâtiments – Paris, 2006

Conseil général des Ponts et Chaussées – Recherche et développement sur les économies d'énergie et les substitutions entre énergies dans les bâtiments – Paris, 2006

Conseil général des Ponts et Chaussées – Maîtrise des émissions de gaz à effet de serre de l'aviation civile – Paris, 2005

Debeir Jean-Claude, Deleage Jean-Paul, Hemery Daniel – Les servitudes de la puissance: Une histoire de l'énergie – Paris, Flammarion, 1986

Enerdata et Lepii – Etude pour une prospective énergétique concernant la France – Paris, Minefi, 2005

Fédération nationale des agences d'urbanisme – Des aires urbaines... aux systèmes métropolitains. Une première approche – Paris, 2006

Grand Lyon – Velo'v. La newsletter – Lyon : n°14, janvier 2007

Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques (GIEC) – Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques – 2001

Groupe « Facteur 4 » – Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050 – Paris, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie, Ministère de l'écologie et du développement durable, 2006

Institut National de la Statistique et des Études Économiques (Délégation Rhône-Alpes) – L'année économique et sociale 2005 – Lyon, 2006

Institut français du pétrole – Le point sur la Gaz Naturel pour Véhicules (GNV) – Lyon, 2006

Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité – Écomobilité : Les déplacements non motorisés, éléments clés pour une alternative en matière de mobilité urbaine – Arcueil, 2003

Lamblin Véronique – Quelles pistes de recherche pour maîtriser l'effet de serre ? – in Futuribles n°315 – Paris, 2006

Laroche Jean-Claude – Le défi énergétique. De l'épuisement des ressources au développement durable – Paris : Les éditions de Paris, 2006

Laurent Marie-Hélène, Recrosio Nelly – Les besoins énergétiques des bâtiments. Les leviers d'action pour une meilleure maîtrise de la demande en énergie dans les bâtiments – in Futuribles n°327 – Paris, 2007

Ministère de l'écologie et du développement durable – Charbon propre. Mythe ou réalité ? – Paris, 2006

Ministère de l'écologie et du développement durable – Recommandations pour un développement durable des Biocarburants en France – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie (Direction générale de l'Énergie et des Matières premières) – Energies et matières premières. Rapport annuel 2005 – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Rapport sur les perspectives de développement de la production hydroélectrique en France – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Les émissions de CO2 liées à la combustion d'énergie dans le monde en 2003-2004 – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – L'énergie en France. Chiffres clés. Edition 2006 – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Bilan énergétique de l'année 2005 en France – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Réserves mondiales prouvées d'uranium – Paris, 2006

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – L'optimisation du dispositif de soutien à la filière biocarburants – Paris : 2005

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Consommations de carburants des voitures particulières en France 1988-2004 – Paris, 2005

Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie – Livre blanc sur les énergies – Paris, 2003

Ministère délégué à la recherche – Nouvelles technologies de l'énergie : proposition de programme de recherche – Paris, 2005

Ministère délégué à la recherche – Nouvelles technologies de l'énergie – Paris, 2004

Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer – Les comptes des transports en 2005 – Paris : 2006

Mission d'évaluation économique de la filière nucléaire – La prospective technologique des filières non nucléaires – Paris : Commissariat général du Plan, 2000

Mission Interministérielle de l'Effet de Serre – La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050. Introduction au débat – Paris : Ministère de l'écologie et du développement durable, 2004

Moisan François – La croissance du transport aérien face aux enjeux de l'effet de serre – Colloque Transport Aérien et Développement Durable Paris : IEP Paris, 2006

Mons Ludovic – Les enjeux de l'énergie. Pétrole, nucléaire, et après ? – Paris : Larousse, 2005

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – Les apports de la science et de la technologie au développement durable ». Tome I : « Changement climatique et transition énergétique : dépasser la crise » - Paris : 2006

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – L'état actuel et les perspective techniques des énergies renouvelables – Paris : 2006

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – Les nouvelles technologies de l'énergie et la séquestration du dioxyde de carbone : aspects scientifiques et techniques – Paris : 2006

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – L'état d'avancement et les perspectives de recherches sur la gestion des déchets radioactifs – Paris : 2005

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – Définition et implications du concept de voiture propre – Paris : 2005

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – La durée de vie des centrales nucléaires et les nouveaux types de réacteurs – Paris : 2003

Parlement (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) – Les perspectives offertes par la technologie de la pile à combustible – Paris : 2001

Radanne P. – Energies de ton siècle ! Des crises à la mutation – Paris : Editions Lignes de Repères, 2005

Rifkin J. – L'économie hydrogène. Après la fin du pétrole, la nouvelle révolution économique – Paris : La découverte, 2002

Sénat (délégation à l'aménagement et au développement durable du territoire) – Rapport d'information sur les énergies locales – Paris, 2006

Total – Hydrogène et piles à combustible – 2006

Les principaux acteurs de la recherche en matière de technologies énergétiques en région lyonnaise

<http://www.aldes.com/siteCORPORATE/corpoHome.asp>

<http://www.axelera.org/>

<http://www.cetiat.fr/index.cfm>

<http://www.elyo.fr/>

<http://www.entpe.fr/Prive/index-recherche.htm>

<http://www.inrets.fr/>

<http://www.insa-lyon.fr/cethyl/>

http://www.ifp.fr/IFP/fr/ifp/fb12_03.htm

<http://www.ifp.fr/IFP/fr/rechercheindustrie/moteurscarburants/fc05.htm>

<http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/textes/sequestration.htm>

<http://www.ingelux.com/accueil3.htm>

<http://www.let.fr/>

<http://www.lyon.cci.fr/site/cms/2005042015065763/Economie-lyonnaise/Secteurs-d-activites/Energie/Caracteristiques/Energie--Caracteristiques?selectedMenu=20060213115634>

http://www.photowatt.com/home/home_fr.php?page=../about/about_fr.htm

<http://www.total-energie.fr/fr/entreprise/historique.php>

Association Lyon Urban Truck & Bus 2015 – Les grands projets du pôle de compétitivité. Dossier de presse – 2006

Institut Français du pétrole – Projet européen Castor. CO2 : du captage au stockage – 2006

Institut Français du pétrole – Rapport annuel 2005 – 2006

Ministère de l'écologie et du développement durable – Charbon propre. Mythe ou réalité ? – Paris, 2006