



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. Devenu un secteur d'activités à part entière avec la révolution industrielle, l'énergie prend une place centrale dans le système économique contemporain dans la mesure où elle constitue la ressource fondamentale de la majeure partie des autres activités.

Aujourd'hui, le marché de l'énergie est déstabilisé par plusieurs facteurs. Avec la forte expansion démographique et économique des géants du Sud (Chine, Inde, Brésil), la croissance de la demande semble prendre de vitesse celle de l'offre. Cette dernière repose principalement sur des ressources fossiles (charbon, gaz, et dans une moindre mesure charbon) en voie d'épuisement. De plus, parce qu'elles sont à l'origine de la quasi-totalité des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, la production et la consommation d'énergie constituent le premier facteur du phénomène du « réchauffement climatique ».

Lorsque l'on porte l'attention sur les « déterminants » de cette nouvelle donne énergétique, on constate que certaines sphères d'activités – les secteurs « résidentiel et services » et « industrie » – et certaines régions du monde – Amérique du Nord, Europe – consomment plus d'énergie que d'autres. En conséquence, certaines régions du monde polluent plus que d'autres. Dans ce monde de l'énergie, la place de la France se caractérise par une moindre croissance de la consommation, un recours moins important aux énergies fossiles pour répondre à cette dernière (reflet de la stratégie nationale de développement de la filière électronucléaire), des émissions de CO₂ nettement moins élevées que dans les autres pays développés.

Sommaire

INTRODUCTION	5
LE CONCEPT D'ÉNERGIE	7
LES TENDANCES DU SECTEUR DE L'ÉNERGIE AUJOURD'HUI.....	15
SOURCES.....	43

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 TENDANCES DU SECTEUR DE L'ÉNERGIE AUJOURD'HUI.....	15
Le marché de l'énergie	15
Jusqu'ici, la croissance de la consommation mondiale d'énergie a été plus rapide que celle de la population.....	15
Les ressources fossiles dominent la production mondiale d'énergie primaire.....	16
Le secteur « résidentiel et services » est devenu le secteur d'activité le plus consommateur d'énergie à l'échelle mondiale.....	17
Quelle offre énergétique primaire pour répondre à la demande à venir ?.....	18
L'énergie et l'environnement	24
La production et la consommation d'énergie constituent le principal facteur du changement climatique.....	24
La répartition des émissions de dioxyde de carbone selon les secteurs de production et de consommation d'énergie	25
La géopolitique de l'énergie	26
Des réserves d'énergie non renouvelables concentrées entre les mains d'une poignée de pays.....	26
Des pays plus consommateurs d'énergie que d'autres	29
Des pays plus pollueurs que d'autres.....	34
La situation de la France dans le monde de l'énergie	35
L'évolution de la consommation et de la production d'énergie de la France.....	35
L'évolution des émissions de dioxyde de carbone de la France.....	40
SOURCES.....	43

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... Devenu un secteur d'activités à part entière avec la révolution industrielle, l'énergie prend une place centrale dans le système économique contemporain dans la mesure où elle constitue la ressource fondamentale de la majeure partie des autres activités. Autrement dit, la croissance économique dépend pour partie de l'évolution des coûts énergétiques. De ce point de vue, la région lyonnaise, et plus largement la région Rhône-Alpes, apparaissent comme des territoires incontournables de la production d'énergie en Europe. S'appuyant sur plusieurs acteurs (entreprises, laboratoires de recherche...) de premiers plans sur la scène énergétique mondiale, la région Rhône-Alpes est la première en Europe pour la production d'électricité. Parce que la métropole lyonnaise ambitionne de renforcer sa place dans le développement des nouvelles technologies de l'énergie au 21^{ème} siècle, le centre de ressource Millénaire 3 de la direction prospective et stratégie du Grand Lyon a souhaité disposer d'un éclairage concernant les enjeux actuels qui sous-tendent les choix technologiques de demain. C'est objet de ce document.

Aujourd'hui, la 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.

Le développement qui suit articule deux approches : la première rappelle les grands principes du concept d'énergie ; la seconde dégage un état des lieux actuel du secteur de l'énergie en tant que marché, facteur de changements environnementaux et question de géopolitique.

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.

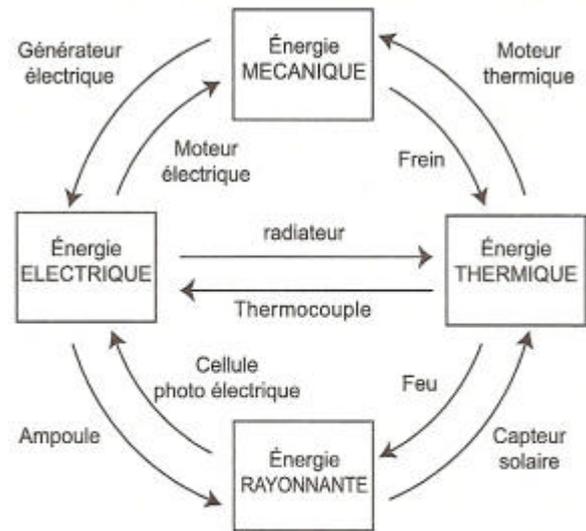
⇒ *La conversion de l'énergie libre en une autre énergie libre*

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.

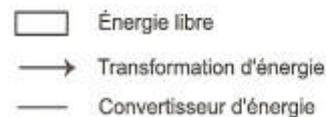
Par ailleurs, toutes les énergies n'ont pas le même niveau de qualité. Certaines sont en effet plus facilement convertibles en d'autres formes et sont ainsi considérées comme plus nobles. Par exemple, le passage de l'énergie mécanique à l'énergie thermique peut se faire spontanément (sans apport

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



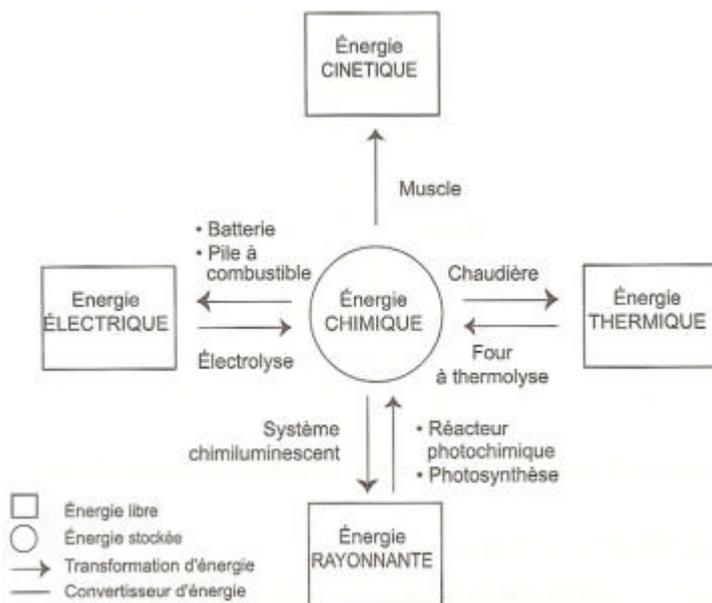
Source : Wiesenfeld B., 2005



⇒ *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

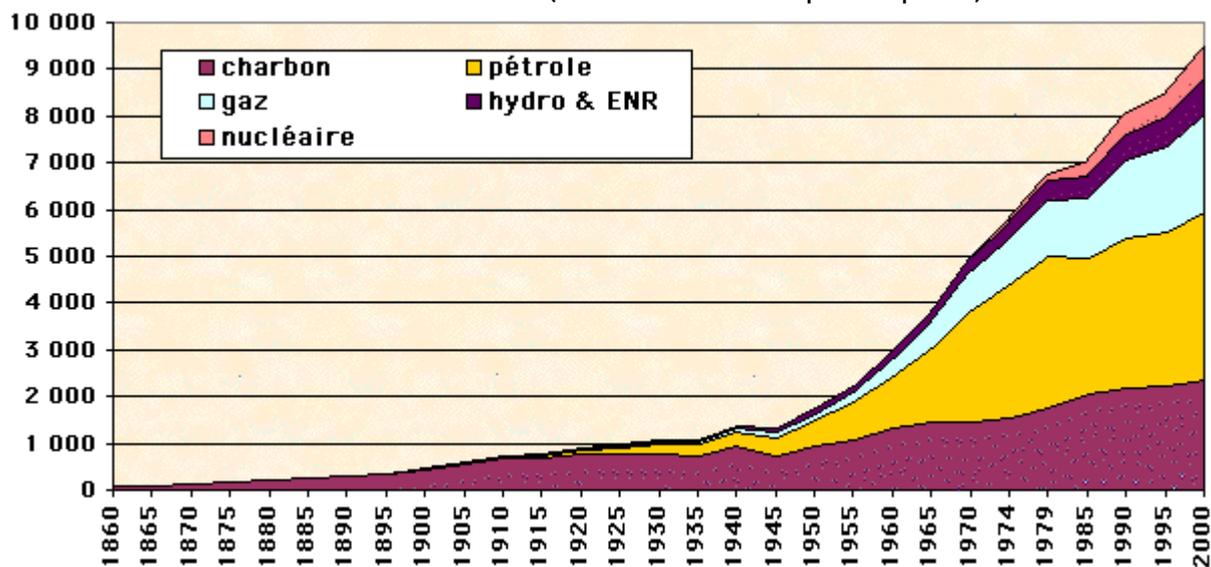
Les chaînes énergétiques ne s'achèvent pas avec la consommation d'énergie finale. Il convient d'ajouter un dernier niveau après l'énergie finale : l'énergie utile qui correspond à la sortie (output) des dispositifs (chaudière, moteurs, ampoules...) assurant la transformation de l'énergie finale en formes 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

LES TENDANCES DU SECTEUR DE L'ÉNERGIE AUJOURD'HUI

Contribution des diverses sources à l'approvisionnement énergétique primaire mondial depuis 1860, hors bois et traction animale (en millions de tonnes équivalent pétrole)



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

Le marché de l'énergie

Jusqu'ici, la croissance de la consommation mondiale d'énergie a été plus rapide que celle de la population

La consommation mondiale d'énergie primaire correspond au volume total de la production commerciale mondiale d'énergie primaire (c'est à dire hors bois, dont une large part échappe aux circuits commerciaux). Celle-ci correspond donc à l'ensemble des consommations finales d'énergie, des pertes liées à la distribution d'énergie et des consommations des producteurs et des transformateurs d'énergie (branche énergie).

Entre 1860 et 2000, la consommation mondiale annuelle d'énergie primaire est passée de moins de 200 millions à près de 10 milliards de Tonne-

équivalent-pétrole¹ (Tep). Cette multiplication par 50 de la consommation énergétique a été nettement plus rapide que celle de la population mondiale qui a été multiplié « seulement » par un peu plus de 5 entre 1850 et 2000, passant de 1,1 milliards d'habitants environ à 6,1 milliards.

On constate cependant que l'augmentation de la consommation d'énergie s'est surtout accélérée après la seconde guerre mondiale ; la consommation mondiale n'est en effet « que » de 1,5 milliard de Tep environ au milieu des années 1940. On note par ailleurs que les seules périodes de relative accalmie dans la croissance ont été des

¹ Une Tep est une unité de mesure permettant de comparer toutes les sources d'énergies entre elles. Elle équivaut à la quantité d'énergie obtenue par la combustion d'une tonne de pétrole.

périodes de grands troubles économiques (crise de 29, chocs pétrolier).

Au total, après s'être très fortement accrue à partir de l'après-guerre la consommation mondiale d'énergie par habitant semble s'être stabilisée depuis le deuxième choc pétrolier (1979) au alentour de 1,5 tep par an.

Les ressources fossiles dominent la production mondiale d'énergie primaire

L'énergie primaire désigne les ressources énergétiques au stade de leur extraction dans l'environnement.

Jusqu'à la révolution industrielle, le système énergétique mondial est centré sur l'exploitation de la ressource forestière, tout en comprenant la mise en valeur de la force du vent et des cours d'eau.

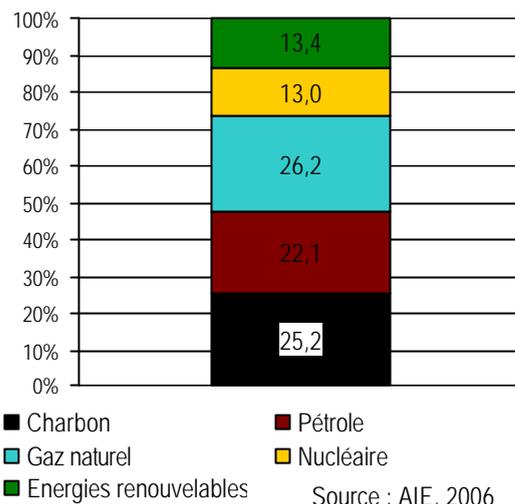
Même modérée, la croissance de la population se traduit par une pression croissante sur les forêts : la surface de forêts en France est deux fois plus faible en 1850 qu'en 2000.

La révolution industrielle offre une solution à cette situation en engageant l'exploitation massive de nouvelles sources d'énergie : les ressources fossiles¹ que sont le charbon (dès le 18^{ème} siècle), le pétrole (à partir du 20^{ème} siècle) et le gaz naturel (à partir du milieu du 20^{ème} siècle). Devenu un véritable marché, l'approvisionnement énergétique va coïncider de façon toujours plus nette durant le 20^{ème} siècle avec l'utilisation des ressources fossiles qui ont pour elles performance énergétique, facilité d'utilisation et relative abondance. Au sortir de la seconde guerre mondiale, et surtout à la suite des chocs pétroliers des années 1970, on observe

¹ Est qualifié de fossile tout objet ou substances renfermés depuis longtemps dans les roches par un processus d'enfouissement ou d'infiltration : animaux fossiles, combustibles fossiles, eaux fossiles...

cependant le développement de l'énergie nucléaire et le renouveau des énergies renouvelables (hydraulique, éolien...).

Contribution de chaque source à la croissance de la production mondiale d'énergie primaire entre 1973 et 2004 (en %)

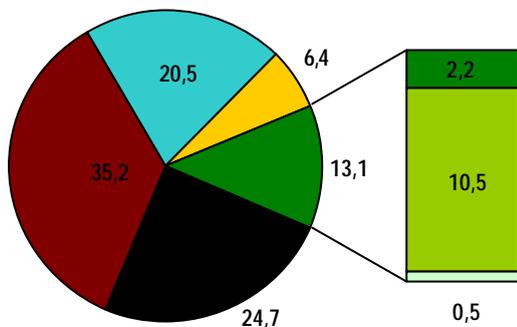


Ainsi entre 1973 (date de création de l'Agence Internationale de l'Energie par les pays importateurs de pétrole) et 2004, ce sont bien les ressources fossiles qui ont contribué le plus fortement (73%) à la croissance de production mondiale d'énergie primaire avec une part du pétrole légèrement en retrait par rapport au charbon et au gaz naturel. Les contributions du nucléaire et des énergies renouvelables se situent toute deux aux alentours de 13%.

Résultat de cette évolution, la production mondiale d'énergie primaire de l'année 2004 est composée à 80,5% de ressources fossiles. Le pétrole est la source d'énergie la plus répandue avec plus de 35% de l'offre mondiale ; de fait, le pétrole constitue aujourd'hui encore la première industrie mondiale, trois des sept plus importantes sociétés mondiales cotées en bourse étant des sociétés pétrolières. Le charbon et le gaz naturel représentant respectivement 24,7 et 20,5% de la production

mondiale d'énergie. Le reste de l'offre est composée de l'énergie nucléaire (7%) et des énergies renouvelables (13%).

Contribution de chaque source d'énergie à la production mondiale d'énergie primaire en 2004 (en %)

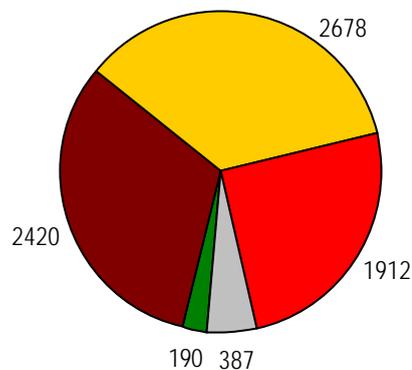


- Charbon
- Pétrole
- Gaz naturel
- Nucléaire
- Hydraulique
- Combustibles renouvelables et déchets
- Autres énergies renouvelables

Source : AIE, 2006

consommateur d'énergie dans le monde ; sa part dans la consommation mondiale d'énergie finale ne représentait que 27,8% en 1990.

Consommation mondiale d'énergie finale par secteur d'activités en 2001 (en millions de Tep)



- Agriculture
- Industrie
- Résidentiel et services
- Transports
- Autres usages (dont non énergétiques)

Source : <http://earthtrends.wri.org>, 2005

Le secteur « résidentiel et services » est devenu le secteur d'activité le plus consommateur d'énergie à l'échelle mondiale

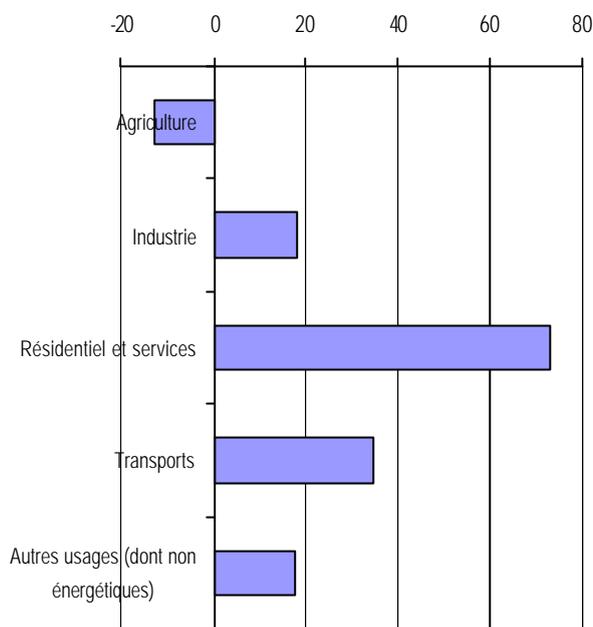
La consommation d'énergie finale désigne la part de la consommation d'énergie primaire qui n'est pas consacrée à la production d'un vecteur énergétique (ex. production d'électricité à partir de la combustion de ressources fossiles) et aux usages non énergétiques (engrais, plastiques, goudrons).

En 2001, la consommation mondiale d'énergie finale s'est élevée à 7,2 milliards de Tep, soit 72% de la consommation d'énergie primaire. Les trois secteurs d'activités qui contribuent le plus à cette consommation sont le secteur résidentiel et services (35,3%), l'industrie (31,9%) et les transports (25,2%). reflet de l'expansion démographique mondiale et de la servicialisation des économies, le secteur « résidentiel et services » est donc devenu le premier

Dans une perspective dynamique, sur la période 1990-2001, on observe en effet que c'est la consommation finale du secteur « résidentiel et services » qui a connu la croissance la plus forte (+73%). Le secteur des transports présente lui aussi connu une croissance soutenue de sa consommation d'énergie (+35%), tandis que celle de l'industrie est plus modeste (+18%), signe de la modernisation progressive de l'appareil de production.

Par ailleurs, en cohérence avec les observations effectuées plus haut, on constate que les énergies fossiles représentent plus de la moitié de la consommation finale de chaque secteur d'activité.

Evolution de la consommation d'énergie finale par secteurs d'activité dans le monde entre 1990 et 2001 (en %)



Source : <http://earthtrends.wri.org>, 2005

Quelle offre énergétique primaire pour répondre à la demande à venir ?

⇒ *En l'état des stratégies énergétiques nationales, la demande mondiale d'énergie primaire s'élèverait à 17 milliards de Tep en 2030*

Lorsque l'on examine les principaux déterminants qui commandent la demande mondiale de sources d'énergie primaire – la démographie, la croissance économique, l'intensité énergétique (quantité d'énergie nécessaire à la production d'une unité de PIB) – on ne peut que constater que ces éléments poussent à une hausse de la demande d'énergie plus forte que celle enregistrée jusqu'ici (Parlement, 2006).

Sur le plan démographique, il faut certes considérer que l'explosion démographique n'aura vraisemblablement pas lieu. Si les projections de l'ONU du début des années 90 tablaient sur une

population mondiale de 11 à 15 milliards d'habitants en 2050, les dernières révisions effectuées tablent, en hypothèse moyenne, sur une population de 9 milliards d'hommes environ en 2050 contre 6 milliards environ en 2000. Deux principaux facteurs concourent à cette rectification démographique : depuis 2003, la majorité de la population mondiale vit dans un pays où le renouvellement des générations n'est plus assuré (fécondité conjoncturelle inférieure à 2,1 enfants par femme) ; l'effet de la pandémie du SIDA se traduit, notamment en Afrique, par une perte de population potentielle de 500 millions d'habitants.

Les trois milliards d'habitants supplémentaires attendus d'ici 2050 seront un premier facteur d'accroissement de la demande dans le demi-siècle à venir. L'analyse des composantes de cette croissance prévisionnelle permet de mieux cerner l'impact de ce premier facteur. Elle montre que les pays forts consommateurs de ressources naturelles ne contribueraient que faiblement à la croissance démographique mondiale (la population des Etats-Unis gagnerait 100 millions d'habitants environ entre 2005 et 2050 tandis que la population européenne reculerait), laquelle serait alimentée essentiellement par des pays présentant d'importants besoins de développement ou déjà sur la voie d'une forte progression économique (l'Inde et la Chine représenteraient près de 3 milliards d'habitants en 2050). La demande d'énergie nécessaire à l'alimentation de ce développement est donc appelée à s'accroître fortement.

Sur le plan de la croissance de la production, en corrélation avec les analyses portant sur la démographie, on constate que l'économie mondiale serait de plus en plus influencée par la dynamique qui anime les pays émergents que sont la Chine et

l'Inde, bien que l'Amérique du Nord conserverait une place incontournable (Parlement, 2006).

- La Chine : le produit intérieur brut de la Chine a été multiplié par 6,4 de 1982 à 2002, et par 4 sur la seule décennie 1992-2002. Son accroissement se poursuit à un rythme de 9-10% l'an, soutenu notamment par un afflux régulier d'investissements étrangers. Entre 1991 et 2003, la Chine a ainsi contribué à 30 % de la croissance mondiale. Certes, en tablant sur la théorie des rendements décroissants du capital, les économistes estiment pourtant que le rythme de la croissance chinoise devrait cependant s'acheminer vers 5-6% d'ici dix ans. Quoi qu'il en soit, la demande intérieure restera durablement importante en raison de l'émergence d'une vaste classe moyenne et des besoins d'une population rurale vivant dans la précarité. Or, actuellement, compte tenu de l'inefficacité relative du système chinois de transformation d'énergie, la consommation d'énergie y croît annuellement de deux points de plus que le PIB.

- L'Inde : La croissance de l'Union indienne est passée d'un taux de 4% dans les quarante années qui ont suivi l'indépendance (1947) à 6% jusqu'en 2000 ; sur les trois derniers exercices elle s'est accélérée avec un taux de 8%. Des études convergentes auraient tendance à montrer que l'Inde a un potentiel de croissance supérieur à celui de la Chine et que cette croissance se maintiendra à un taux au moins proche de 6 % jusqu'en 2040. Or, la croissance indienne repose, en matière d'énergie, sur un schéma assez proche de celui de la Chine.

- L'Amérique du Nord : les taux de croissance de l'économie nord-américaine sont relativement élevés pour une économie très développée (de 3,5% à 4%). Des taux de croissance de cet ordre aboutissent à des progressions du PIB non négligeables : une multiplication par 2,8 en trente ans ; une multiplication par 5,8 en 50 ans.

D'un point de vue théorique, il paraît raisonnable de retenir un taux de croissance mondial annuel de 2,2% entre 2000 et 2050 dans la mesure où celui-ci correspond au taux de progression de la productivité des pays industrialisés et au taux minimum nécessaire au développement économique des autres pays (J.L.Bobin, E.Huffer et H.Nifenecker, 2005).

Sur le plan de l'intensité énergétique – rapport entre la consommation d'énergie et le PIB exprimés à prix constant – on observe que celle-ci est plus faible dans les pays industriels (J.L.Bobin, E.Huffer et H.Nifenecker, 2005). En 2000, l'intensité énergétique (en tonne équivalent pétrole) par 1 000€ est estimée à 0,375 à l'échelle mondiale, 0,172 pour le Japon, 0,273 pour l'Union Européenne, 0,288 pour les Etats-Unis, 0,899 pour la Chine. A l'échelle mondiale, on constate que l'intensité énergétique n'a crû qu'au 19^{ème} siècle, c'est à dire quand l'Europe s'est industrialisée en recourant massivement à un charbon minéral utilisé de façon très peu efficace (le rendement initial de la machine à vapeur était inférieur à 1%). Au cours du 20^{ème} siècle, l'intensité n'a crû que dans quelques régions, dont l'Europe de l'Est qui a donné priorité au développement des industries lourdes sans aucun souci de productivité, et plus récemment l'Amérique latine pour des raisons tenant surtout à ses crises économiques. En général, la baisse de

l'intensité énergétique s'est accentuée d'une période à l'autre, sauf lorsque la diminution du prix relatif de l'énergie a découragé la recherche d'une plus grande efficacité énergétique, ce qui a été le cas entre 1950 et 1973 et à partir de 1986. Depuis les années 2000, le prix de l'énergie connaît cependant une recrudescence qui appelle de nouveaux efforts en matière d'économie d'énergie. Autrement dit, il n'y a pas de similitude absolue entre développement et utilisation croissante similaire des quantités d'énergie utilisées, même si la courbe de consommation est globalement en augmentation. Cela signifie donc que la hausse du PIB peut s'accompagner d'une moindre tension sur le marché énergétique, en particulier sur celui des combustibles fossiles, ou encore qu'à PIB constant la consommation tend à décroître.

A partir des tendances démographiques et économiques, à situation technologique inchangée et donc en l'absence de nouvelle politique, l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) élabore régulièrement une projection de la consommation mondiale d'énergie à l'horizon 2030 et 2050. Les résultats du dernier exercice ont été communiqués au début du mois de novembre 2006. Ils font état d'une progression de 53% de la demande mondiale d'énergie primaire entre 2004 et 2030 (de 11 à près de 17 milliards de Tep), dont 70% proviendrait des pays en développement. En l'état du « mix énergétique », cette augmentation se traduirait par exemple par une demande mondiale de pétrole qui pourrait atteindre 116 millions de barils par jour en 2030 contre 84 millions en 2005. Enfin, pour bien mesurer le potentiel d'accélération de la consommation mondiale d'énergie, il faut souligner que : en 2000, si chaque habitant de la planète avait consommé comme un européen

(consommation moyenne par habitant), la consommation mondiale d'énergie aurait été de 29 milliards de Tep au lieu des 11 milliards constatés.

⇒ *Vers un nouveau choc pétrolier*

La période de bas prix du pétrole que l'on a connue depuis 1986 s'est achevée en septembre 2000, quand les cours du pétrole ont quitté la barre de 25\$ le baril pour s'élever, en 2005, jusqu'à 70\$. Ces tensions découlent principalement de l'accélération de la demande évoquée plus haut, mais également d'un problème physique de renforcement des capacités d'approvisionnement. P.Radanne (2005) souligne en effet l'insuffisance, suite au contre-choc pétrolier (1985-2000), des investissements dans la production pétrolière, la capacité de raffinage et la construction d'installation de logistique. Or, on sait dès à présent que la réalisation de ces investissements nécessaires, s'ils sont lancés, ne produira ses effets que dans un délai compris entre 5 et 10 ans.

Plus encore que les capacités de production pétrolières dont le déficit demeure un phénomène conjoncturel, c'est l'état des réserves de pétrole qui offre la meilleure indication pour entrevoir l'évolution à venir de ce marché central du système énergétique. Fin 2005, les réserves prouvées¹ de pétrole conventionnel étaient estimées à 163 milliards de tonnes environ (BP, 2006), chiffre à référer aux 130 milliards de tonnes de pétrole déjà extraites de la croûte terrestre (P.Radanne, 2005). Ce volume représente 40 ans environ de réserves pétrolières au niveau de consommation de 2005. Or, comme la demande de pétrole va continuer à croître fortement dans les années à venir –

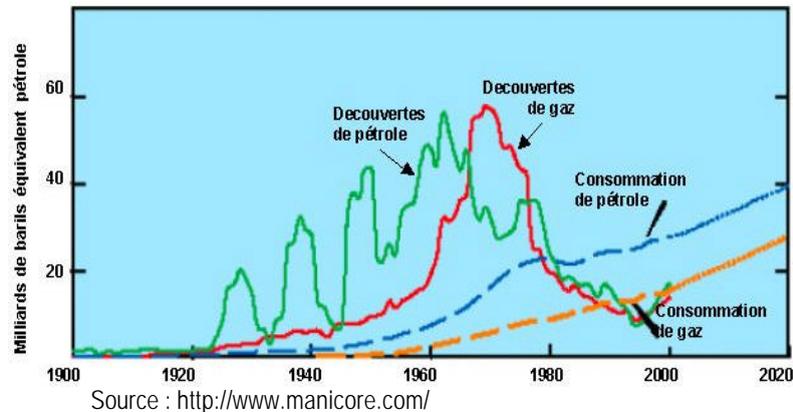
¹ Les réserves dites prouvées concernent les champs déjà mis en exploitation et dont l'extraction est certaine avec les techniques disponibles et aux conditions économiques du moment

rappelons que l'humanité a consommé autant de pétrole entre 1980 et 2000 qu'entre 1859 et 1980 (J.M.Jancovici, A.Grandjean, 2006) – le pic de production pourrait être atteint dès les années 2010 (J.Rifkin, 2002). Ces réserves conventionnelles doivent en outre être considérées de façon prudente dans la mesure où plus des 2/3 se situent au Moyen-Orient. En effet, de nombreux experts pétroliers mettent en doute les volumes de réserves déclarées par les pays de la région, notamment par l'Arabie Saoudite : en cas de ressources nationalisées, chaque pays déclare comme il l'entend ses ressources, sans expertise indépendante et avec un penchant pour la surestimation afin de peser davantage dans les négociations commerciales et politiques. Le Moyen-Orient présente de plus des risques politiques de nature à relativiser la permanence de la disponibilité de ces ressources.

Par ailleurs, le maintien des réserves de pétrole au niveau du début des années 1990 résulte surtout d'une réévaluation des gisements existants, compte tenu des progrès réalisés dans la récupération du pétrole. En effet, le maximum des découvertes de pétrole conventionnel date des années 1960 ; depuis le début des années 1980, en dépit des efforts déployés, on consomme chaque année trois fois plus de pétrole qu'on en découvre. En revanche, le taux de récupération du pétrole est passé de 25% avant les chocs pétroliers des années 1970 à 35% aujourd'hui (P.Radanne, 2005). Un point de progression de ce taux représente deux ans de consommation mondiale. On estime qu'il serait possible de porter ce taux moyen à 50 % (accroissement qui représenterait une activation des réserves de l'ordre de 117 milliards de tonnes),

soit environ 30 années de consommation (Parlement, 2006).

Découvertes annuelles de pétrole et de gaz depuis 1900 (en de barils équivalent pétrole)



A côté des réserves prouvées, il existe des ressources de pétrole conventionnel non encore découvertes. En l'état des estimations de l'United States Geological Survey, seul organisme dans le monde qui réalise des études exhaustives sur le sujet, elles s'élèveraient à 140 milliards de tonnes. Mais, situées dans des couches géologiques beaucoup plus profondes que les gisements actuels, ces réserves mobiliseraient des moyens technologiques beaucoup plus importants. De plus, outre le pétrole conventionnel, certains observateurs soulignent l'existence de réserves de pétrole non conventionnel, c'est à dire d'hydrocarbures denses et fortement visqueux qui doivent être fluidifiés ou allégés pour être produits en quantités suffisantes et économiquement rentables. Ces réserves, qui concernent principalement les bruts extra lourds du Venezuela et les sables asphaltiques du Canada, représenteraient environ 20 années de consommation au rythme actuel (Parlement, 2006). Au delà, on estime que les réserves mondiales de charbon pourraient se substituer au pétrole avec la fabrication de carburants de synthèse.

Au vu de ces éléments, P.Radanne (2005) estime qu'il est aujourd'hui nécessaire d'évacuer la notion « physique » d'épuisement du pétrole pour lui substituer une notion « économique » de potentiel de croissance en regard d'un niveau de coût : la non rentabilité économique de l'exploitation du pétrole non conventionnel face à une demande se détournant de cette énergie est un scénario tout à fait possible. En effet, on peut raisonnablement penser que le prix du baril de pétrole atteigne rapidement 100\$, puis un niveau proche ou supérieur à 150\$ dans un délai de dix à quinze ans. Les effets de ce nouveau choc pétrolier seront différents de ceux des années 1970. D'une manière générale, les effets sur la croissance européenne devraient être particulièrement durs. Comme le souligne le Parlement (2006), l'augmentation récente de 30\$ à 60\$ le baril a correspondu à une ponction de l'ordre de 0,4-0,5 point de PIB pour les économies de la zone euro ; soit pour des taux de croissance moyens qui n'excèdent pas 2%, des prélèvements de l'ordre de 20 à 25%. Si on raisonne de façon linéaire, un pétrole à 120\$ le baril aurait un impact de 1,5 point de PIB sur des économies à faible croissance si elles n'y étaient pas préparées ; soit un prélèvement des trois-quarts qui ne laisserait subsister qu'une croissance résiduelle de PIB de 0,5%. A 150\$, tout effet de croissance serait annulé sauf modification de la politique industrielle mise en place auparavant. Mais, à la différence des chocs précédents, l'économie américaine devrait être touchée directement cette fois-ci, ne pouvant plus compter sur les réserves pétrolières nationales. Dans le monde en développement, l'augmentation du prix du baril ne devrait pas poser de sérieux problèmes aux pays émergents bénéficiant d'une croissance

très vigoureuse, mais freinera encore davantage la progression des pays les moins avancés.

Au total, c'est le principe même de la mondialisation économique que remet en cause l'augmentation du prix du pétrole, cette dernière pouvant entraîner une rétraction de l'économie mondiale (P.Radanne, 2005 ; Parlement, 2006). Premièrement, le prélèvement d'une part croissante du PIB des pays consommateurs de pétrole au profit des pays producteurs devrait se traduire par un recul de la demande mondiale. D'autre part, parce que la mondialisation de l'économie est fondée sur la mobilité, le choc pétrolier devrait frapper de plein fouet un secteur particulier : les transports. L'augmentation des coûts des chaînes logistiques (aérien, maritime, routier) des entreprises pourrait fortement déstabiliser le fonctionnement de l'économie mondiale, à savoir la mise en concurrence à l'échelle mondiale des coûts de facteurs de production et les échanges en flux tendus.

Enfin, il faut considérer qu'un pétrole à 150\$ le baril aurait des effets individuels très lourds sur notre organisation sociale actuelle, comme le transport automobile individuel, le fret de marchandises ou le chauffage. Le passage du prix du baril de 30\$ à 60\$ a déjà eu des effets dans ces domaines.

⇒ *Les réserves des autres combustibles fossiles : abondance du charbon et trajectoire similaire au pétrole pour le gaz naturel*

Pour ce qui concerne les autres ressources fossiles que sont le gaz naturel et le charbon, les réserves sont contrastées.

Le charbon apparaît véritablement comme la ressource fossile la plus abondante et la plus répandue sur la planète. Fin 2004, les réserves prouvées sont de l'ordre de 637 milliards de Tep,

soit 155 années environ de réserves au niveau de consommation de 2005 (BP, 2006).

En revanche, les réserves prouvées de gaz naturel s'avèrent beaucoup plus limitées : estimées à 154 milliards de Tep fin 2005, celles-ci représentent 65 ans environ de réserves au niveau de consommation de 2005 (BP, 2006). Mais la demande de gaz devrait elle aussi augmenter sensiblement dans les années à venir du fait de sa substitution croissante au pétrole.

⇒ *La mesure des réserves d'uranium dépend de l'évolution technologique des réacteurs nucléaires*

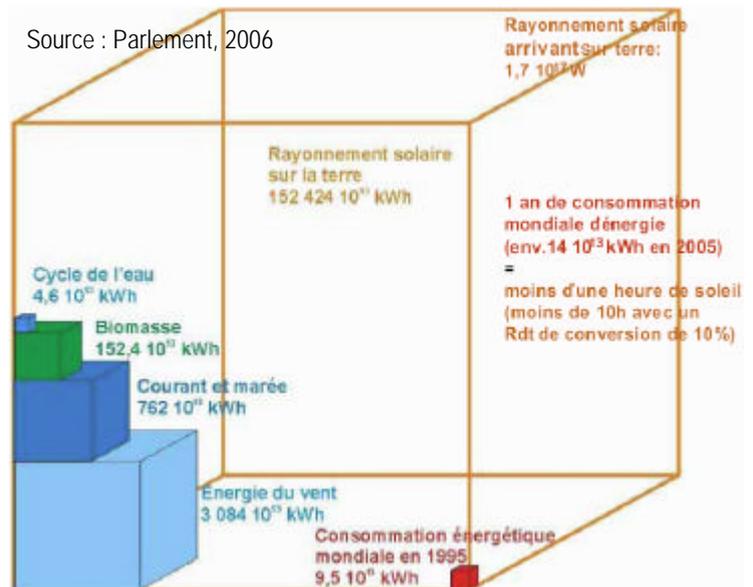
Au 1^{er} janvier 2006, les réserves mondiales d'uranium récupérable à un coût inférieur à 80\$ le kilo sont estimées à 2,6 millions de tonnes, soit 26 milliards de Tep (Minéfi, 2006). Ces réserves correspondent à 60 ans de fonctionnement des réacteurs actuels. Mais la durée de vie de ces réserves peut être fortement accru si la technologie des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides étaient généralisée (réacteur produisant autant voire plus de combustible fissile qu'ils n'en consomment) : les réserves seraient alors multipliées par 50. De plus, sans limitation de coût de production, l'addition de toutes les ressources minières répertoriées aujourd'hui dépasse un total de 17 millions de tonnes soit environ 300 ans de consommation actuelle à des conditions d'accès toutefois très différentes. Enfin, l'exploitation des ressources non conventionnelles (phosphates, eau de mer) permettrait de multiplier les réserves sus mentionnées par 100 (Minéfi, 2006).

⇒ *L'étendue du potentiel des énergies renouvelables*

Les énergies renouvelables présentent l'avantage d'être présentes partout dans le monde et d'être

potentiellement presque illimitées par rapport à nos besoins (Parlement, 2006). En effet, le rayonnement solaire annuel représente 5 000 fois la consommation mondiale d'énergie, l'énergie du vent 300 fois, les courants et marées 80 fois et la biomasse 15 fois.

Potentiel mondial des énergies renouvelables



Toutefois, d'une manière générale, les énergies renouvelables présentent l'inconvénient majeur sont diffusées dans l'espace et intermittentes dans le temps. Autrement dit, elles fournissent des puissances faiblement concentrées et continues (en fonction de la pluviométrie, de l'alternance du jour et de la nuit ou du régime des vents). Par exemple, pour produire 1 million de kW pendant une année, il faut : 2,6 millions de tonnes de charbon ou 1,8 millions de tonnes de pétrole réparties entre 5 centrales thermiques, ou un réacteur nucléaire, ou encore 12 barrages de type Serre-Ponçon, 1 500 éoliennes de 2 000 kW, réparties sur 150 km, 18 usines marémotrices identiques à celle de la Rance, ou de 70 à 100 km² de panneaux solaires (Parlement, 2006).

Ainsi, les énergies renouvelables demandent des investissements considérables et ne sont pas en capacité d'assurer à coup sûr une réponse aux pics de consommation d'électricité.

L'énergie et l'environnement

La production et la consommation d'énergie constituent le principal facteur du changement climatique

⇒ *Induit par l'élévation des températures, le changement climatique est la principale menace environnementale pour l'humanité au 21^{ème} siècle*

On observe dès aujourd'hui les manifestations d'un changement climatique planétaire qui va s'accroître à l'avenir : changement du régime des précipitations (humidité et aridité accrues), élévation du niveau des mers, multiplication des événements extrêmes (cyclone, sécheresse, inondations...), réduction de la biodiversité... Ces changements climatiques sont liés à l'augmentation des températures de l'atmosphère terrestre : +0,6°C durant le 20^{ème} siècle et entre +1,4 et +5,8°C sont attendus pour le siècle en cours selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques (GIEC, 2001).

Concrètement, l'« évolution plancher » de +1,4°C sur un siècle constitue déjà une élévation importante de la température moyenne : c'est le double de l'augmentation enregistrée au 20^{ème} siècle. La perspective d'une élévation de 5,8°C apparaît quant à elle catastrophique, pour ne pas dire apocalyptique (D.Bourg, 2004 ; J.M.Jancovici, A.Grandjean, 2006). Un écart de 5°C correspond tout simplement à un changement d'ère climatique.

L'analyse des précédentes ères glaciaires qu'a connu la planète – baisse de 5°C par rapport aux températures que l'on connaît aujourd'hui – montre que ce type de changement a entraîné à plusieurs reprises des extinctions massives d'espèces, dont certaines ont failli être fatales à la vie sur Terre. Dès lors, quelles peuvent être les conséquences d'une variation thermique de même amplitude orientée cette fois-ci à la hausse ?

Cette augmentation des températures est due à l'accroissement de la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre au-delà de ce qui est nécessaire pour la vie humaine¹.

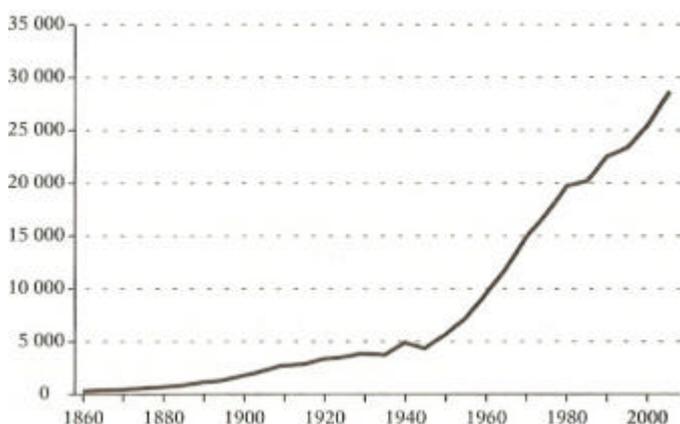
⇒ *Les émissions de gaz carbonique sont principalement le fait de la production et de la consommation d'énergie*

Cet accroissement de la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre n'est pas naturel, il résulte de la croissance des émissions de gaz à effet de serre résultant des activités humaines. Parmi l'ensemble de ces émissions anthropiques, celles concernant le dioxyde de carbone (CO₂) en représentent plus de la moitié. Si la déforestation contribue à en accroître le volume annuel – la réduction de la surface forestière diminuant la quantité de CO₂ absorbée continuellement par les végétaux – le gaz carbonique, concrètement, est généré par la

¹ Les gaz à effet de serre – vapeur d'eau, gaz carbonique ou dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde d'azote (NO_x), le protoxyde d'azote (N₂O), les chlorofluorocarbones (CFC), l'ozone (O₃) – permettent de confiner dans la basse atmosphère une partie du rayonnement solaire (infra-rouge) qui est réfléchi au niveau de la croûte terrestre. Agissant comme les vitres d'une gigantesque serre, les gaz à effet de serre modifient le bilan thermique de la surface terrestre. Si l'ensemble du rayonnement solaire réfléchi par la planète était renvoyé dans l'espace, la température moyenne à sa surface serait de 30°C inférieure à celle dont nous bénéficions aujourd'hui (15°C) : la vie ne serait pas possible !

production et la consommation d'énergie induites par les activités humaines (Ademe, 2006). La combustion des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon) lors de leur utilisation énergétique finale (carburant, chauffage...) ou de la production d'électricité se traduit en effet par la libération de gaz carbonique dans l'atmosphère. Ainsi, une tonne de charbon libère ainsi 3,7 tonnes de CO₂ (Parlement, 2006).

Evolution des émissions de dioxyde de carbone d'origine fossile depuis 1860 (en millions de tonnes)



Source : J.M.Jancovici, A.Grandjean, 2006

Sensible dès le premier stade énergétique de la révolution industrielle – charbon+machine à vapeur – la croissance des émissions de carbone d'origine fossile a connue une accélération considérable après la deuxième guerre mondiale avec l'essor des consommations pétrolières. Depuis, le seul événement ayant entraîné un ralentissement passager est le choc pétrolier de 1979. Sur la période récente, 1973-2004, les émissions de carbone d'origine fossile sont ainsi passées de 15,7 à 26,6 milliards de tonnes, soit une augmentation de 70%, la consommation mondiale d'énergie primaire s'accroissant de 83% sur la même période (AIE, 2006). Toujours selon l'AIE, à structure de consommation égale, la poursuite la croissance de

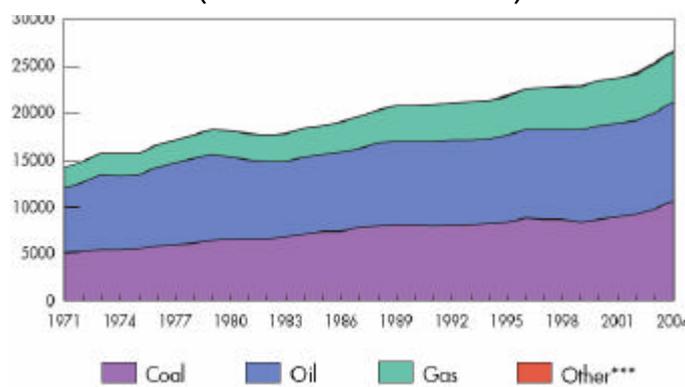
la demande mondiale d'énergie aboutirait dès 2030 à un doublement des émissions de CO₂ par rapport à ce qu'étaient ces émissions en 2000, atteignant ainsi le seuil des 40 milliards de tonnes annuel.

La répartition des émissions de dioxyde de carbone selon les secteurs de production et de consommation d'énergie

Ainsi, seuls 20% de l'énergie primaire produite et consommée chaque année dans le monde ne portent pas, ou peu, atteinte au climat : le nucléaire et les énergies renouvelables.

La responsabilité respective des différentes énergies primaires fossiles aux émissions de CO₂ dépend de la teneur en carbone de celles-ci – la composition du charbon présente davantage de molécules de carbone que celle du pétrole qui en possède plus que le gaz naturel – et de la part de chacune d'elles dans la production d'énergie primaire. En 2004 (AIE, 2006), on constate que 20% des émissions annuelles mondiales de CO₂ sont dues au gaz naturel, 40% au pétrole et 40% pour le charbon.

Evolutions des émissions mondiales de CO2 entre 1971 et 2004 (en millions de tonnes de CO2)

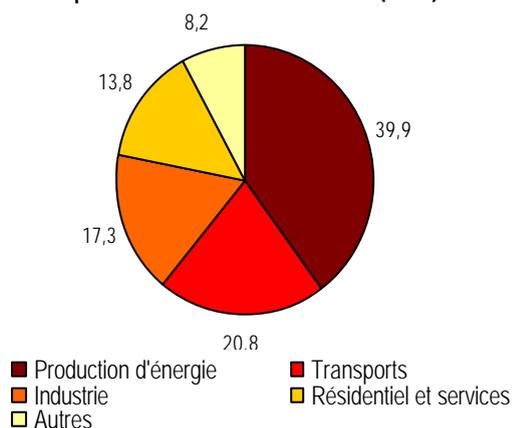


Source : AIE, 2006

Pour mieux saisir ce processus d'émission de CO₂ à partir de la combustion de ressources fossiles, il faut porter l'attention sur les activités qui consomment ces ressources. A l'échelle planétaire,

le secteur de la production d'énergie (production d'électricité, raffinage...) est responsable de 40% des émissions de gaz carbonique de l'année 2002 (AIE, 2004), du fait principalement de la prévalence de l'emploi de combustibles fossiles pour le fonctionnement des centrales : la croissance modeste de la production hydroélectrique et le développement limité du nucléaire n'empêchent pas le fait que, en 2004, 40% de la production électrique mondiale provient de centrales à charbon, 20% de centrales à gaz, 8% de centrales au pétrole, 16% de centrales nucléaires, 16% de centrales hydroélectrique (AIE, 2006).

Répartition des émissions mondiale de CO2 par secteurs d'activité en 2002 (en %)



Source : AIE, 2004

Les 60% restant des émissions de CO2 résultent donc des usages directs des combustibles fossiles : en 2002, près de 21% des émissions de CO2 sont dues aux transports, 17% aux activités industrielles, près de 14% au secteur résidentiel et aux activités de services, le reste étant lié à un ensemble hétérogène d'activités dont l'agriculture (AIE, 2004).

La géopolitique de l'énergie

Appréhender la question de l'énergie sous l'angle géopolitique suppose d'inverser le raisonnement mobilisé pour analyser la dimension marchande de celle-ci : quelles évolutions des consommations pour quelles évolutions des approvisionnements ? En effet, dans l'environnement fini que constitue la planète, c'est bien le volume et l'accès aux ressources énergétiques primaires qui orientent sur le long terme les dynamiques de consommations.

Des réserves d'énergie non renouvelables concentrées entre les mains d'une poignée de pays

Si les énergies renouvelables sont a priori disponibles sur toute la planète sans discrimination, l'accès aux ressources fossiles et, dans une moindre mesure, fissiles est en revanche beaucoup plus contrasté. Il constitue depuis longtemps une question géopolitique majeure.

⇒ *La majeure partie des réserves prouvées de pétrole et de gaz est détenue par les pays du Moyen-orient*

Fin 2005, les pays du Moyen-orient détiennent 62% des réserves mondiales de pétrole et 40% des réserves mondiales de gaz. Les pays de l'ex-URSS¹ disposent également d'une part importante des réserves mondiales de pétrole (10%) et de gaz (32%). La richesse énergétique du Moyen-orient et des pays de l'ex-URSS apparaît d'autant plus forte que les réserves se situant dans ces régions ont été fortement réévaluées entre 1985 et 2005 : +72% pour le pétrole et +161% pour le gaz du côté du Moyen-orient ; +96% et +46% pour les pays de l'ex-URSS (BP, 2006). Dans le même temps, la région

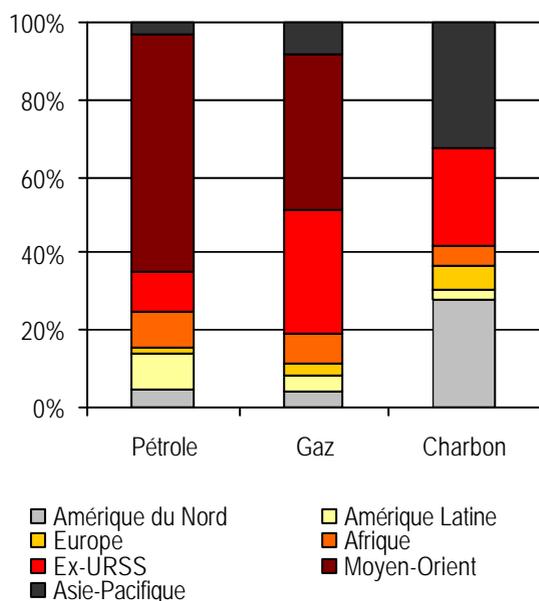
¹ Arménie, Azerbaïdjan, Biélorussie, Estonie, Georgie, Kazakhstan, Kirghizstan, Lettonie, Lituanie, Moldavie, Ouzbékistan, Fédération de Russie, Tadjikistan, Turkménistan, Ukraine

la plus consommatrice d'énergie, l'Amérique du Nord (cf. point suivant), a vu ses réserves pétrolières et gazières se réduire respectivement de 44% et 26%.

Pour ce qui concerne les réserves mondiales de charbon – deuxième énergie primaire consommée dans le monde – la répartition mondiale est sensiblement différente. Les réserves de charbon se répartissent en effet en trois grandes parts entre la région Asie-Pacifique (33%), l'Amérique du Nord (28%) et les pays de l'ex-URSS (25%).

D'une manière générale, l'Amérique Latine, l'Europe et l'Afrique apparaissent nettement comme les régions les moins bien dotées en ressources fossiles puisqu'elles ne détiennent respectivement que 4%, 5% et 7% des réserves mondiales (charbon, pétrole et gaz confondus).

Répartition des réserves mondiales de ressources fossiles par région fin 2005 (en %)



Source : BP, 2006

Cette concentration des ressources fossiles place de fait les pays consommateurs dans une situation de dépendance vis-à-vis des pays producteurs. En

effet, ces derniers n'ont pas la maîtrise directe de la continuité de leur approvisionnement. Ce dernier peut donc se détériorer pour des raisons indépendantes de leur volonté.

La dégradation de l'approvisionnement peut être induite, tout d'abord, par des crises conjoncturelles dans les pays producteurs de ressources fossiles. Par exemple, l'année 2004 a été marquée par la crise vénézuélienne : à la suite d'une longue grève du personnel de l'industrie pétrolière nationale, les exportations du pays se sont presque taries, ce qui a généré des tensions sur l'équilibre offre/demande. Les stocks stratégiques des pays consommateurs ont joué leur rôle d'amortisseur le temps que la production reparte.

Mais les risques géopolitiques majeurs sont d'une autre nature et se concentrent au sein d'une région spécifique : le Moyen-orient. Depuis les années 1970, nous savons que les réserves d'énergie fossiles situées dans cette région constituent un terrain propice à la manifestation de tensions croissantes opposant la civilisation musulmane et la civilisation occidentale (J.Rifkin, 2002). Sans entrer dans l'analyse détaillée des facteurs alimentant ces tensions croissantes, il faut souligner le reflux dans les pays arabes du mouvement d'occidentalisation (fondation de véritables Etats-nation, séparation de l'église et de l'Etat...) qui s'était engagé après la seconde guerre mondiale. Celui-ci en effet n'a pas débouché sur de véritables progrès économiques et sociaux : symbole des tentatives de sécularisation de la civilisation musulmane, l'Egypte avait à peu près le même niveau de vie que la Corée du Sud en 1950, alors qu'il est cinq fois inférieur aujourd'hui. L'occidentalisation n'a pas permis non plus d'offrir un vecteur diplomatique permettant de régler le conflit israélo-palestinien. Depuis les années 1970,

en contre-pied, se déploie progressivement un mouvement d'affirmation du fondement islamique de l'identité des peuples arabes.

Celui-ci a trouvé à s'exprimer au travers de la ressource pétrolière, les pays arabes mesurant le rôle central jouée par celle-ci dans le mode de développement des pays occidentaux. Les pays arabes membres majoritaires de l'Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole (OPEP) utiliseront pour la première fois l'arme du pétrole – hausse des prix, embargo – durant la guerre du Kippour opposant Israël à l'Égypte et la Syrie pour dénoncer le soutien très net accordé à Israël par les pays occidentaux. Mais la dégradation de l'approvisionnement pétrolier sera aussi une conséquence indirecte des mouvements de réislamisation des États des pays arabes : révolution islamique en Iran en 1979 qui débouche sur une suspension de la production durant plusieurs mois ; guerre Iran-Irak au début des années 1980 qui conduit également à une réduction des volumes de production. De façon contradictoire, le maintien à un niveau élevé du cours du pétrole durant les années 1970 et jusqu'à la deuxième moitié des années 1980 a permis d'endiguer la montée du fondamentalisme religieux : riches des fameux pétro-dollars, les gouvernements des États arabes sont restés en place en subventionnant très fortement le fonctionnement économique et social de leur pays.

Mais la fin des années 1980 a marqué la fin de l'influence des pays arabes de l'OPEP, les pays occidentaux fortement dépendants du pétrole voyant leur stratégies de diversification énergétique et d'approvisionnement (les autres pays producteurs de pétrole sont fortement sollicités et de nouveaux gisements sont mis en exploitation)

porter leur fruit : le prix du baril redescend au niveau d'avant les chocs pétroliers. La manne financière des États arabes se réduit comme peau de chagrin, déstabilisant fortement leur légitimité. Dès lors, le mouvement fondamentaliste reprend son essor dans son combat pour trouver un débouché électoral et la construction d'une communauté islamique mondialisée (J.Rifkin, 2002).

Ainsi, dans les pays arabes, alors que la tendance est à la prise du pouvoir par les fondamentalistes religieux, l'évolution de la géographie mondiale des réserves pétrolières fait état d'une perspective implacable : quel que soit le moment du pic de production du pétrole, une fois celui-ci franchi, la quasi-totalité des réserves de pétrole non exploitées se trouvera entre les mains de pays du Moyen-Orient. Autrement dit, il n'y aura plus de possibilités d'approvisionnement alternatives. Les pays arabes de l'OPEP se retrouveront en position de force sur le marché mondial. Dès lors que ces réserves se trouveraient sous l'influence croissante des fondamentalistes, plusieurs scénarios sont possibles (J.Rifkin, 2002) : une simple accentuation de la hausse des prix, hausse qui est inéluctable dans l'absolu puisque l'ensemble des réserves mondiale est sur le déclin ; la suspension de la production pour prendre le reste du monde en otage, dans l'espoir d'arracher des concessions politiques ; la vente exclusive de pétrole aux pays majoritairement musulmans. Ces différentes possibilités peuvent d'ailleurs se combiner : la hausse des prix pour réalimenter le fonctionnement économique et social interne ; l'embargo vers l'occident pour peser sur les relations internationales ; l'approvisionnement préférentiel pour favoriser la construction de la communauté islamique universelle.

Au total, dans les années qui viennent le problème de l'amointrissement des ressources fossiles va se doubler d'un problème de localisation de ces ressources dans des régions instables.

⇒ *Moins concentrées, les réserves d'uranium sont situées dans des régions plus stables*

Les réserves de minerai d'uranium sont moins concentrées dans l'espace (Minefi, 2006). L'Australie possède la part la plus importantes des réserves mondiales avec 27%. Seuls deux autres pays possèdent plus de 10% des ressources en Uranium : le Kazakhstan avec 14% et le Canada avec 13%. Par ailleurs, ces pays sont situés dans des régions bien plus stables sur le plan politique que ne l'est le Moyen-orient.

L'accès à l'uranium ne constituent donc pas aujourd'hui un problème majeur, d'autant qu'en cas de tensions croissantes sur ce marché, la technologie des réacteurs surgénérateurs, produisant autant voire plus de combustibles fissiles qu'ils n'en consomment, peut offrir une solution de taille.

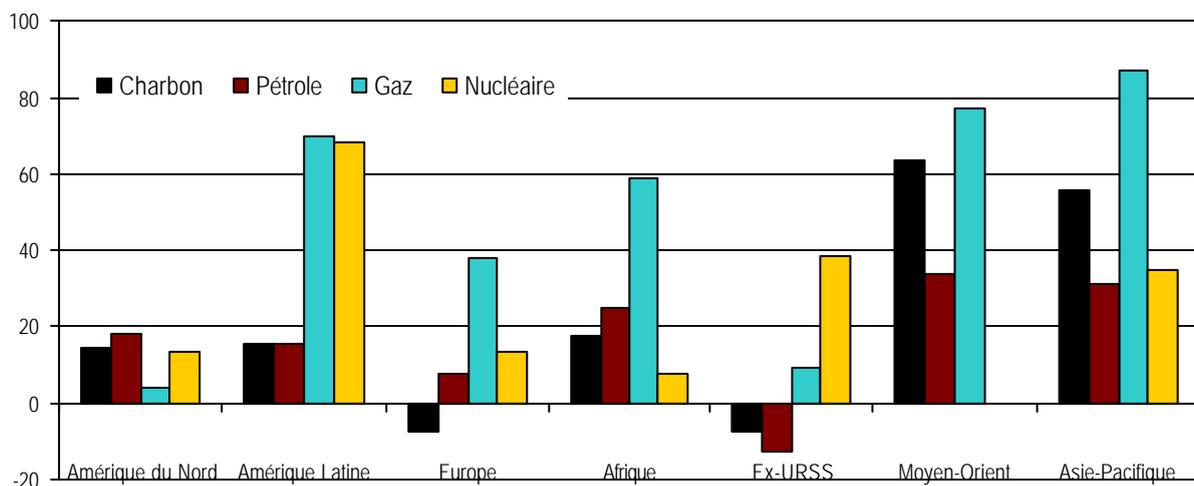
Des pays plus consommateurs d'énergie que d'autres

Cette distribution inégale des ressources énergétiques détermine plus ou moins fortement les dynamiques régionales de consommation d'énergie.

⇒ *L'évolution récente de la consommation d'énergies primaires (hors énergies renouvelables) par région*

Entre 1995 et 2005, l'accroissement des consommations a été particulièrement vigoureux au Moyen-orient et en Asie-Pacifique : la consommation de ressources fossiles augmente de moitié dans ces deux régions sur la période. La dynamique de consommation du Moyen-orient s'explique d'abord par la profusion des ressources pétrolières et gazières dont dispose cette région et qui ne plaide pas pour la sobriété ; la croissance de la consommation de charbon dans la région est à relativiser au vu de la faiblesse des volumes en jeu. La région Asie-Pacifique connaît quant à elle une croissance économique et démographique vertigineuse, laquelle suscite une demande d'énergie toujours plus élevée. La croissance de la consommation de charbon de la région Asie-Pacifique concerne en revanche des volumes

Evolution des consommations d'énergies fossiles et nucléaire par région entre 1995 et 2005 (en%)



Source : BP, 2006

considérables.

Répondant à de forts besoins de développement et à une croissance démographique soutenue, la consommation d'énergie de l'Amérique Latine et de l'Afrique connaît également un accroissement important, même si celui-ci concerne essentiellement le gaz. L'évolution de la consommation d'énergie nucléaire de l'Amérique Latine est à relativiser dans la mesure où cette région part d'un niveau très faible au milieu des années 1990.

La croissance des consommations d'énergies primaires (hors énergies renouvelables) est en revanche nettement moins dynamique dans les régions anciennement industrialisées : Amérique du Nord et Europe. Parce qu'elle tend à être tirée de plus en plus majoritairement par les services, la croissance économique de ces régions est en effet de plus en plus déconnectée de la consommation d'énergie, d'où un rythme de croissance de la demande d'énergie sensiblement inférieur à celui des régions émergentes. L'évolution de la consommation d'énergie de ces deux régions se caractérise également par un certain équilibre entre les différentes sources. Les Etats-Unis disposent encore (mais jusqu'à quand) de réserves pour chaque ressources fossiles et fissiles. Dans le cas de l'Europe, la diversification des consommations s'inscrit d'abord dans une stratégie de maîtrise de la dépendance vis-à-vis des pays producteurs d'énergie primaire ; l'évolution des consommations énergétiques de l'Europe correspond également à une volonté de substituer le gaz au charbon pour la production d'électricité.

Les pays de l'ex-URSS enregistrent quant à eux la croissance de la consommation d'énergie la plus faible (+0,3% seulement pour les ressources

fossiles). Leur consommation de charbon et de pétrole recule d'ailleurs entre 1995 et 2005. A la suite de l'effondrement de l'empire soviétique, la fermeture de pans entiers de l'industrie et les difficultés économiques des populations ont en effet engendrées une baisse importante de la demande d'énergie dans ces pays (L.Pons, 2005).

⇒ *La consommation d'énergies primaires (hors énergies renouvelables) par région en 2005*

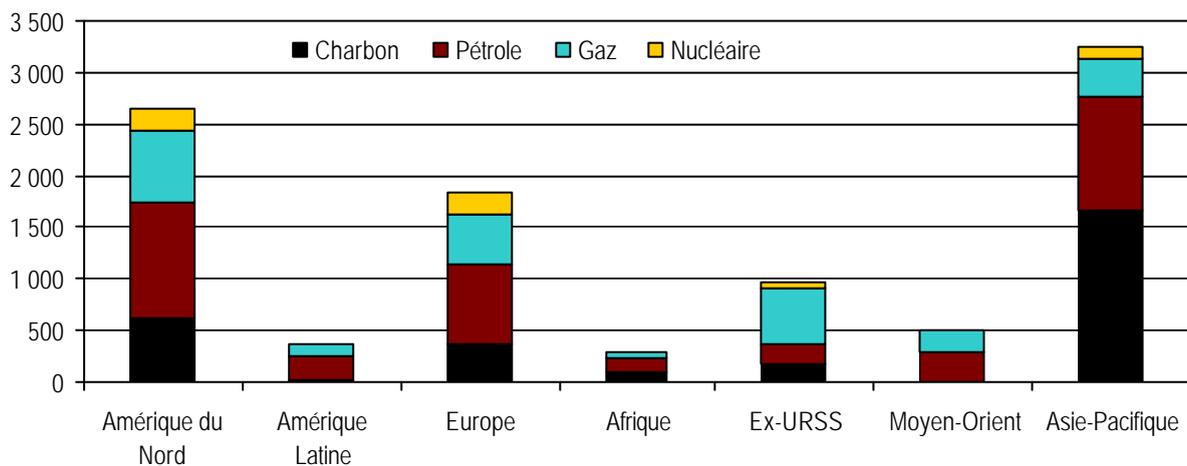
La photo en 2005 de la consommation d'énergie primaire (hors énergies renouvelables) par région, et par région et par habitant, permet d'affiner et de nuancer la situation observée en dynamique.

Nouveau centre de gravité de l'économie mondiale et géant démographique, la région Asie-Pacifique est devenue la première région consommatrice d'énergie primaire (hors énergies renouvelables) au monde. En 2005, elle représente le tiers de la consommation mondiale d'énergie primaire. La composition de sa consommation confirme la place prépondérante accordée au charbon qui représente la moitié des approvisionnements. Toutefois, lorsqu'on la rapporte à sa population, la consommation d'énergie primaire de la région Asie-Pacifique apparaît comme particulièrement faible en comparaison des autres régions. Ceci s'explique d'abord par les contrastes de dynamiques de développement existant entre les pays de cette région, ainsi qu'au sein même de certains d'entre eux : la Chine et l'Inde, par exemple, se caractérisent par une société à deux vitesses, une partie de la population et du territoire tirant pleinement partie de l'insertion dans l'économie mondiale pendant que l'autre demeure très rurale et agricole.

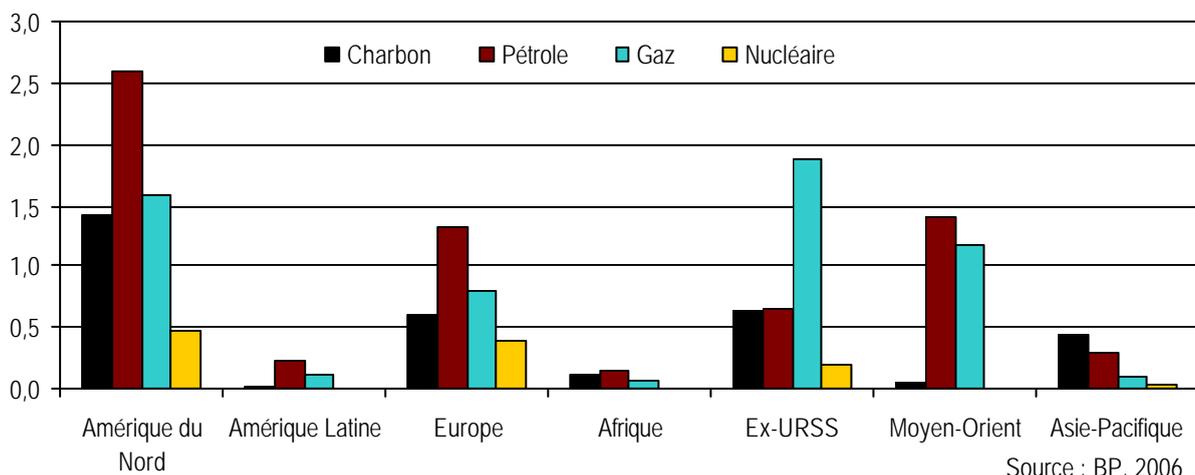
Expression de leur niveau avancé de développement, la consommation d'énergie de l'Amérique du Nord et de l'Europe les placent respectivement en deuxième et troisième position dans la hiérarchie mondiale des besoins énergétiques. Conformément à leur dynamique de consommation sur la période 1995-2005, ces deux régions présentent un « mix énergétique » relativement équilibré sur l'année 2005 ; l'Europe se distingue de l'Amérique du Nord par une contribution plus importante du nucléaire au détriment du charbon. L'Amérique du Nord se situe cependant nettement au dessus de l'Europe du fait

de comportements économiques et domestiques très énergivores. Détenant les ratios consommation d'énergie/habitant les plus élevés au monde pour l'ensemble des énergies primaires (sauf pour le gaz et hors énergies renouvelables), l'Amérique du Nord se caractérise en effet par un taux d'équipement très important en appareils électroménagers et en véhicules automobiles : par exemple, on compte 785 véhicules personnels et utilitaires pour 1000 habitants aux Etats-Unis contre 585 en France ; 65% des ménages américains sont équipés de la climatisation contre moins de 10% des ménages français (L.Pons, 2006). Ainsi, à

Consommation d'énergies primaires (hors énergies renouvelables) par région en 2005 (en millions de Tep)



Consommation d'énergies primaires (hors énergies renouvelables) par région et par habitant en 2005 (en Tep)



Source : BP, 2006

niveau de vie équivalent, chaque nord-américain consomme presque deux fois plus d'énergie qu'un européen. Ne bénéficiant pas, à la différence de l'Amérique du Nord, d'abondantes réserves énergétiques, l'Europe a été touchée de plein fouet par les chocs pétroliers des années 1970. Les pays européens se sont en effet lancés dans une vigoureuse stratégie d'économie d'énergie pour réduire les coûts ainsi que la dépendance énergétique.

Compte tenu de leur dynamique récente de consommation d'énergie et de la faible densité de population qui les caractérisent, les pays de l'ex-URSS apparaissent logiquement en retrait par rapport aux régions européenne et nord-américaine. Riche en ressource gazière, l'ex-URSS assure la plus grande partie de sa consommation (56%) sur celle-ci. Du point de vue de la consommation d'énergie par habitant, le gaz apparaît ainsi largement prédominant. Ceci s'explique aussi par l'obsolescence des infrastructures de production et de distribution du gaz (source de pertes importantes) ainsi que par une politique interne de commercialisation héritée de l'ère soviétique et caractérisée des prix très bon marché.

La consommation d'énergie du Moyen-Orient paraît faible à l'échelle mondiale. Cependant, au regard de sa population (avec moins de 200 millions d'habitants, c'est de loin la région la moins importante sur le plan démographique), celle-ci est loin d'être négligeable. Les abondantes ressources pétrolière et gazière du Moyen-Orient alimentent 98% de la consommation d'énergie de la région. Sans entrave, l'accélération de cette dernière se traduit par des ratios consommation/habitant particulièrement élevés.

Enfin, alors qu'elles sont dotées de ressources non négligeables et qu'elles rassemblent des populations importantes, l'Amérique du Sud et surtout l'Afrique connaissent un niveau de consommation d'énergie marginal à l'échelle mondiale. La croissance de leur consommation d'énergie relevée plus haut ne doit donc pas masquer le fait que ces régions répondent à la plus grande partie de leurs besoins énergétiques par l'intermédiaire des ressources forestières (biomasse) dont l'accès demeure direct et gratuit. La faiblesse de la consommation d'énergies primaires par habitant de l'Amérique du Sud et de l'Afrique ne fait que confirmer cette réalité. Rappelons ici que environ deux milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'électricité (L.Mons, 2006)

⇒ *L'Europe apparaît comme la région la plus dépendante des autres pour son approvisionnement énergétique*

Si l'on met en rapport les dynamiques régionales de consommation d'énergie fossiles avec celles concernant les capacités de production permises par les réserves décrites plus haut, les réserves d'énergie fossiles correspondantes, il est possible d'appréhender le taux d'indépendance énergétique¹ de chaque région.

Cet angle d'analyse permet tout d'abord de mettre en évidence les vocations exportatrices de certaines régions. Les pays de l'Ex-URSS et du Moyen-Orient disposent en effet d'une capacité de production qui dépasse largement les besoins de leurs populations. C'est constat est aussi valable, mais dans une moindre mesure, pour l'Amérique Latine et l'Afrique. Ces deux régions sont certes des

¹ Ratio de la production d'énergie primaire sur la consommation d'énergie primaire

acteurs importants des marchés de l'énergie mais l'ampleur de leurs réserves est largement accentuée par la faiblesse de leur consommation interne.

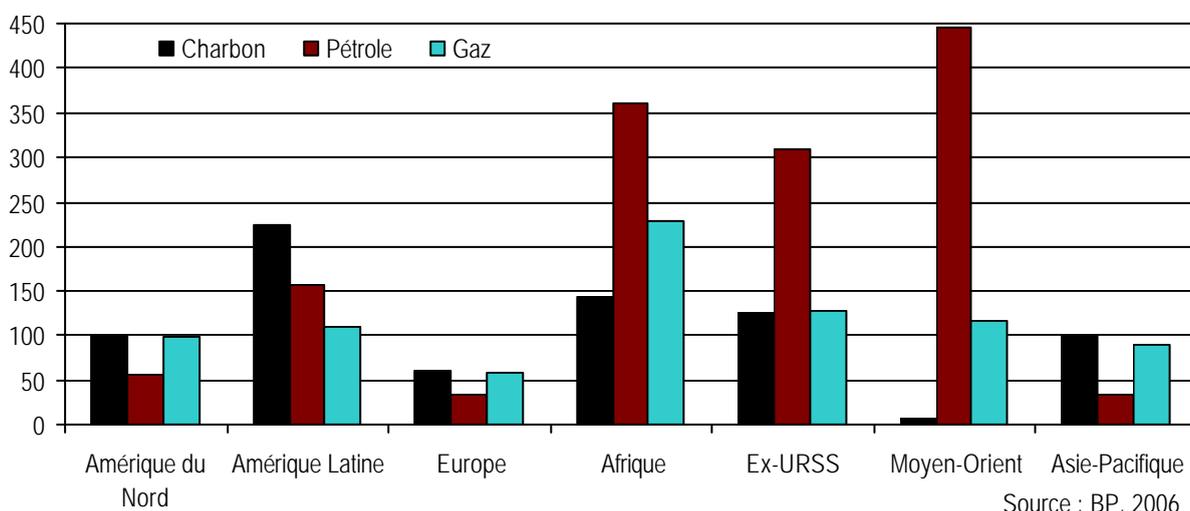
On constate par ailleurs que les trois principales régions consommatrices d'énergie sont aussi celles dont les taux d'indépendance sont les moins élevés. Toutefois, les régions Asie-Pacifique et Amérique du Nord se distinguent dans la mesure où elles figurent à la fois parmi les trois principales régions consommatrices et parmi celles disposant des principales réserves de charbon. L'Asie-Pacifique et l'Amérique du Nord bénéficient d'une indépendance complète pour leur approvisionnement en charbon ; cette ressource, pourtant fortement émettrice de CO₂, devrait être encore fortement sollicitée par ces deux régions pour répondre à la croissance à venir de leurs besoins d'énergie. Leurs taux d'indépendance sont également élevés pour le gaz naturel.

C'est donc l'Europe qui connaît le décalage le plus marqué entre niveau de consommation et niveau de production d'énergie ; à l'échelle des pays, le Japon est dans une situation encore plus déséquilibrée. Confrontée la première à l'épuisement de ses faibles ressources, l'Europe devrait voir son taux

d'indépendance énergétique se réduire encore davantage à l'avenir.

Dans un contexte marqué par la disparité géographique et l'épuisement accéléré des ressources fossiles, un nombre croissant de pays va être confronté à la nécessité de répondre au déséquilibre de leur balance énergétique. Dans un avenir proche, produire de l'électricité grâce à l'énergie nucléaire apparaît comme une option de première importance au vu du rapport avantageux qu'offre celle-ci entre le volume de combustible consommé et la quantité d'énergie produite. Mais la filière nucléaire civile reste peu développée dans le monde. D'abord réservée à un club de 10 pays en 1965 – Allemagne de l'Ouest, Belgique, Canada, Etats-Unis, France, Italie, Royaume-Uni, URSS et Suède – la technologie du nucléaire civil est utilisée par 14 pays en 1970, 19 en 1975, 30 en 1985 et 32 à l'heure actuelle. D'une part, l'énergie nucléaire concerne des dispositifs technologiques particulièrement complexe et coûteux : il faut du temps, des moyens et des besoins très importants pour assumer la mise en place d'une telle filière de production d'énergie. D'autre part, cette voie est freinée par la communauté internationale, qui regarde avec une extrême vigilance, voire avec

Taux d'indépendances en énergies fossiles par région en 2005 (en %)



méfiance, le développement de cette énergie dans des zones réputées peu sûres. Sur un plan géopolitique, le nucléaire civil présente en effet l'inconvénient majeur de pouvoir être détourné pour servir des fins militaires ; les trafics de matières fissiles représentent ainsi un nouveau danger pour la sécurité dans le monde.

Des pays plus pollueurs que d'autres

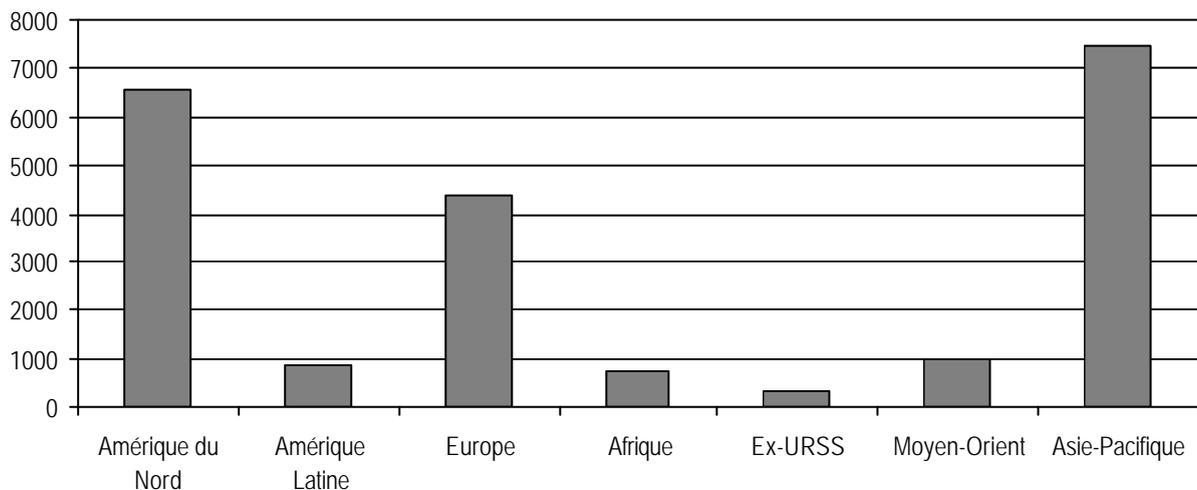
En aval des dynamiques de production et de consommation d'énergie, se pose la question de la contribution des différentes régions aux émissions mondiales de CO₂. Les émissions régionales reflètent assez nettement les différences de

consommation d'énergie – en volume comme en matière de mix énergétique – décrites jusqu'ici.

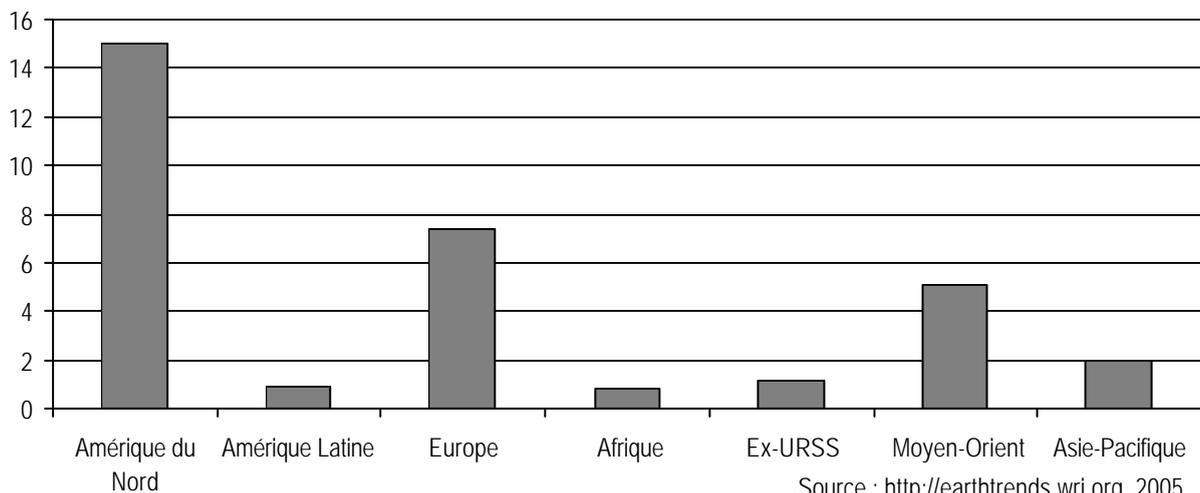
⇒ *Les émissions de dioxyde de carbone par région*

Connaissant un développement sans précédent, l'Asie-Pacifique est la région dont la production et la consommation d'énergie de génèrent les émissions de CO₂ les plus massives avec près de 7,5 milliards de tonnes. Se différenciant par un mode de vie et de production particulièrement énergétivore, l'Amérique du Nord arrive logiquement en deuxième position avec 6,5 milliards de tonnes. Avec une population pourtant sensiblement supérieure à celle de l'Amérique du Nord, l'Europe présente des émissions de CO₂ nettement inférieures à celles de

Emissions de CO₂ par région en 2001 (en millions tonnes)



Emissions de CO₂ par région et par habitant en 2001 (en tonnes)



Source : <http://earthtrends.wri.org>, 2005

cette région. Si les technologies et les comportements européens sont plus vertueux que ceux des nord-américains, il n'en reste pas moins que les émissions de CO₂ de l'Europe sont nettement plus importantes que celles des autres régions du monde.

Les facteurs expliquant la « faiblesse » des émissions des autres régions du monde ont été évoqués plus haut : le faible niveau de développement pour l'Amérique Latine et l'Afrique ; une population limitée pour les pays de l'ex-URSS et du Moyen-orient. Alors qu'il possède la population la moins élevée de ces quatre dernières régions, le Moyen-orient génère cependant les émissions les plus importantes.

⇒ *L'Amérique du Nord détient le mode de développement contribuant le plus au réchauffement de l'atmosphère*

Confronter le volume des émissions aux données démographiques permet de mieux cerner la responsabilité de chaque région.

Sous cet angle, l'Amérique du Nord apparaît clairement comme la région la plus polluante en matière d'émission de CO₂. Compte tenu de l'ancienneté du développement industriel de cette région et de la durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère (un siècle), la plus grande partie des émissions passées incombe à cette région. Région la plus développées au monde avec les Etats-Unis, l'Europe prend en toute logique elle aussi une part de responsabilité importante dans les émissions mondiales de dioxyde de carbone.

A l'inverse, la prise en compte de la population conduit à relativiser l'ampleur des émissions de la région Asie-Pacifique ; elle peut aussi fortement interpeller puisqu'elle permet de mesurer le potentiel d'augmentation de ces émissions dans la

perspective de la participation au développement d'une part toujours croissante de la population de la région.

Pour ce qui concerne les autres régions, le ratio CO₂/habitant a tendance à renforcer les constats établis précédemment. Les émissions de l'Amérique Latine, de l'Afrique et de l'ex-URSS apparaissent d'autant plus marginale, tandis que celles du Moyen-orient correspondent effectivement à des dynamiques de production et de consommation plus énergétivores que dans les autres pays en développement.

La situation de la France dans le monde de l'énergie

L'évolution de la consommation et de la production d'énergie de la France

⇒ *L'évolution de la consommation d'énergie primaire de la France entre 1973 et 2005*

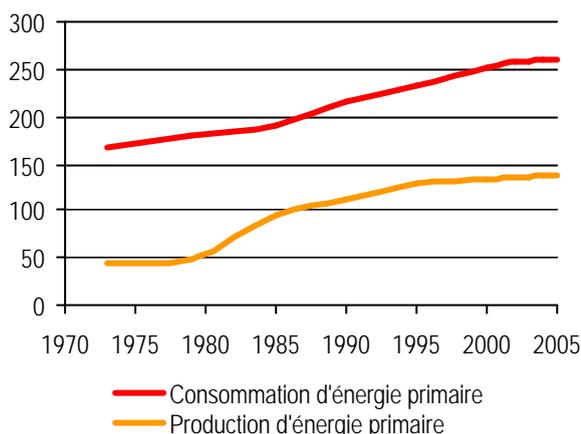
A l'échelle d'un pays, la consommation d'énergie primaire ne coïncide jamais de façon absolue au volume de sa production interne d'énergie primaire. Pour ce qui concerne la France, les données disponibles pour ces deux variables portent sur la période 1973-2005.

Elles font état d'une augmentation de près de 55% sur la période de la consommation française d'énergie (hors usages non énergétiques de ressources fossiles), de 168,7 à 260,9 millions de Tep, avec une nette accélération de la croissance à partir du contre-choc pétrolier du milieu des années 1980¹. Cette progression est nettement inférieure à celle de la consommation mondiale d'énergie

¹ Le prix du baril est passé de près de 80\$ en 1980 à moins de 25\$ en 1986

primaire sur la même période (+90,5%) : de 6 à 11,4 milliards de Tep. De plus, bien que la consommation d'énergie primaire de la France se soit elle aussi accrue plus rapidement que sa population, ce décalage est nettement moins marqué qu'à l'échelle mondiale.

Evolution de la consommation et de la production d'énergie primaire de la France entre 1973 et 2005 (en millions de Tep)



Source : Minefi, 2006

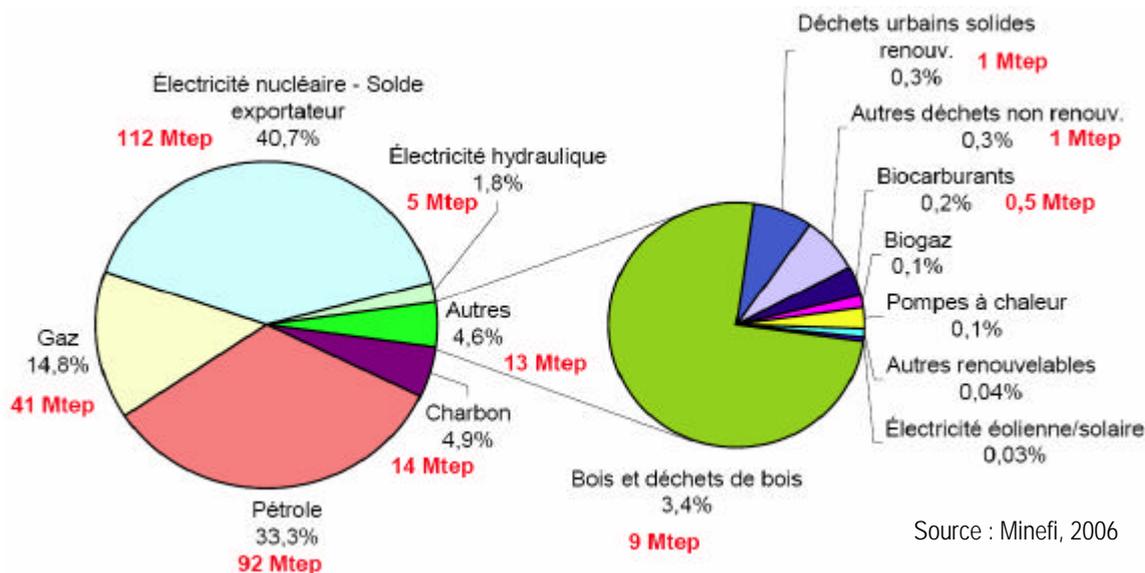
Sur la même période, la production française d'énergie primaire a été quant à elle multipliée par 3, passant de 43,5 à 137,6 millions de Tep. Cette évolution est le résultat de la stratégie d'indépendance énergétique conduite par la France depuis les années 1970.

⇒ *La composition de la consommation et de la production d'énergie primaire de la France en 2005*

A la différence des observations faites à l'échelle mondiale, les ressources fossiles ne constituent que 50% de la consommation d'énergie primaire de la France de 2005 (276,5 millions de Tep). Le pétrole représente cependant à peu près la même part qu'à l'échelle mondiale (un tiers). Signe de la politique d'indépendance énergétique conduite par la France depuis les années 1970, le nucléaire représente en effet plus de 40% de la consommation d'énergie primaire du pays en 2005.

Face à cette structure de consommation, la composition de la production française d'énergie primaire se caractérise par la place centrale prise par la filière nucléaire qui en représente 85,5% : entre 1973 et 2005, la puissance de production nucléaire du pays est passée de 15 à 452 milliards de kWh ; il faut cependant noter que la France est dépourvue de ressources fissiles, puisque la dernière mine d'uranium française – Le Bernardan en Haute-Vienne – a été fermée en 2001.

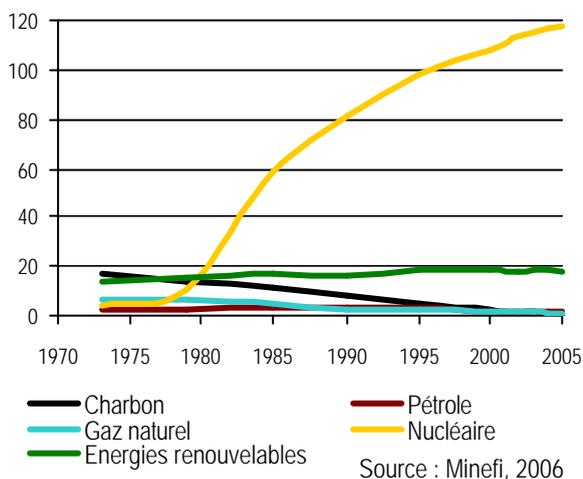
Composition de la consommation d'énergie primaire de la France en 2005 (en % et millions de Tep)



Source : Minefi, 2006

La production nationale d'énergies fossiles est en revanche largement marginale, la France ne possédant quasiment pas de réserves de pétrole et de gaz, tandis que l'exploitation de ses réserves de charbon, extrêmement marginale à l'échelle mondiale puisque représentant 15 millions de tonnes en 2005 contre 6,7 milliards rien que pour l'Allemagne (BP, 2006), n'est plus rentable face à l'offre internationale et a été progressivement stoppée à partir des années 1960.

Evolution de la production française d'énergies primaires entre 1973 et 2005 (en millions de Tep)



La production d'énergie à partir de sources renouvelables présente une évolution modeste puisqu'elle est passée de 14 à 17 millions de Tep entre 1973 et 2005. De fait, sa part dans l'ensemble de la production française d'énergie primaire s'est fortement réduite : de 32% en 1973 à 13% en 2005. Cette proportion pourrait cependant s'accroître à l'avenir avec l'exploitation du potentiel constitué par les énergies renouvelables pour la production d'électricité de réseau mais aussi pour la production de chaleur décentralisée. Si l'on s'en tient à la question de la production d'électricité d'origine renouvelable, on observe que 30% du potentiel hydroélectrique exploitable de façon rentable de la

France n'ont pas encore été mis en valeur¹, tandis que les données les plus récentes concernant les apports attendus des autres énergies renouvelables sont les suivants : le rayonnement solaire fait bénéficier l'ensemble du territoire français de 700 000 milliards de kWh chaque année, soit l'équivalent de 60 milliards de Tep, à comparer aux 276,5 millions de Tep d'énergie primaire consommés par la France en 2005 (CEA, 2005) ; le potentiel technique de l'éolien en France se compose de 30 millions de kW sur terre (10% des surfaces où la vitesse moyenne du vent est supérieure à 6 m/s) permettant de produire 66 milliards de kWh/an, et de 30 millions de kW également en mer (zones à moins de 30 km des côtes et à moins de 30 m de profondeur) mais pour une production de 90 milliards de kWh/an (Ministère délégué à la recherche, 2004) ; sur le plan géothermique, le potentiel à haute température (roches chaudes) du pays représenterait 100 à 135 milliards de kWh/an, tandis que les ressources géothermiques à très basse température (inférieure à 50°C) sont présentes sur la quasi-totalité du territoire français (Ministère délégué à la recherche, 2004).

⇒ *La dépendance énergétique de la France vis-à-vis de l'étranger est contrastée*

Reflète de la politique énergétique conduite par la France depuis les années 1970 en faveur de la filière nucléaire, la consommation d'électricité du pays est intégralement supportée par la production nationale. Si la France compte moins de réacteurs

¹ La contribution annuelle de l'hydraulique à la production électrique en France est de 70 milliards de kWh/an pour une capacité installée de 25 milliards de Watts. Cette production se situe en dessous du maximum techniquement exploitable de façon rentable qui est estimé à 100 milliards de kWh/an environ (Minefi, 2006).

en activité (58) que les Etats-Unis, mais arrive en première position en termes de contribution du nucléaire à la production d'électricité (78% en 2004). Cette stratégie a permis de consolider le taux d'indépendance énergétique totale de la France qui est passé de 24% à 50% entre 1973 et 2005. Cette évolution est cependant à nuancer par le fait que, durant cette période, la dépendance énergétique de la France vis-à-vis de l'étranger pour ce qui concerne les énergies fossiles est devenue totale.

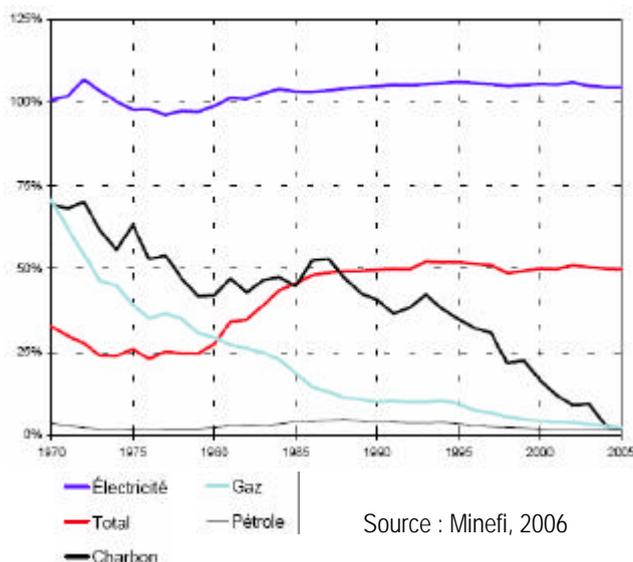
⇒ *La France consomme proportionnellement moins d'énergies fossiles mais plus d'énergie nucléaire que les autres pays riches*

Si l'on observe la consommation d'énergies primaires (hors renouvelables) par habitant en 2005 de chacun des dix pays les plus riches du monde (par le niveau de PIB en 2004), on constate que la France figure parmi ceux qui consomment le moins d'énergies fossiles : elle est le pays qui consomme le moins de charbon (0,2 tep/habitant) ; elle se situe parmi les pays les moins consommateurs de gaz naturel (0,7 tep) ; sa consommation de pétrole (1,5 tep) est inférieure à la moyenne sur les dix pays en question mais supérieure à celle relevée pour l'ensemble de l'Europe (1,3 tep). En revanche, la France présente logiquement la consommation la plus élevée en matière d'énergie nucléaire.

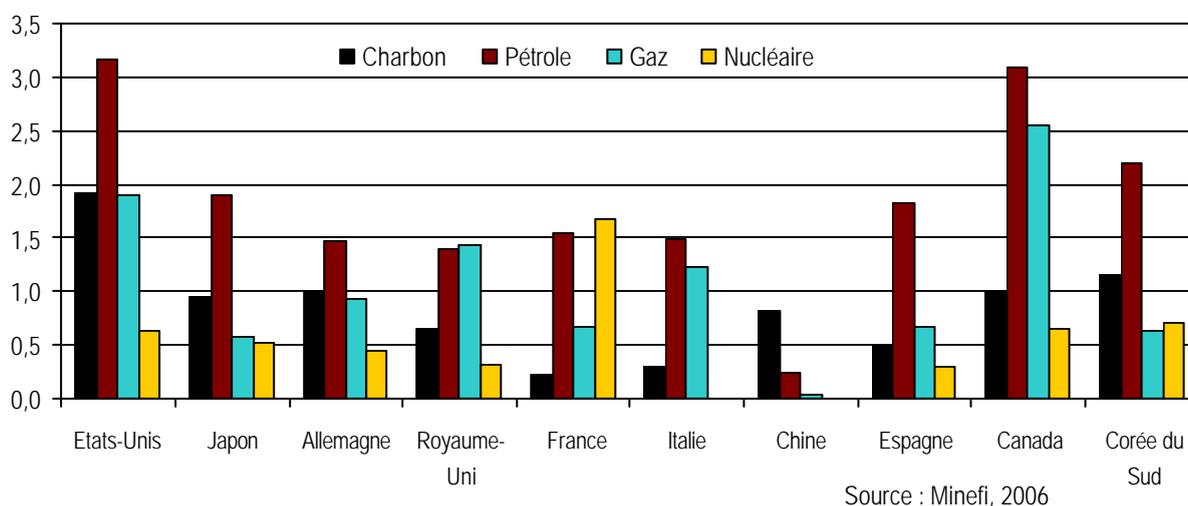
⇒ *L'évolution de la consommation d'énergie finale par secteurs d'activité de la France entre 1973 et 2005*

En 2005, la consommation d'énergie finale de la France s'est élevée à 160,6 millions de Tep, soit 62% de sa consommation d'énergie primaire (Minefi, 2006). Entre 1973 et 2005, on constate que c'est la consommation d'énergie du secteur des transports qui connaît la croissance la plus forte

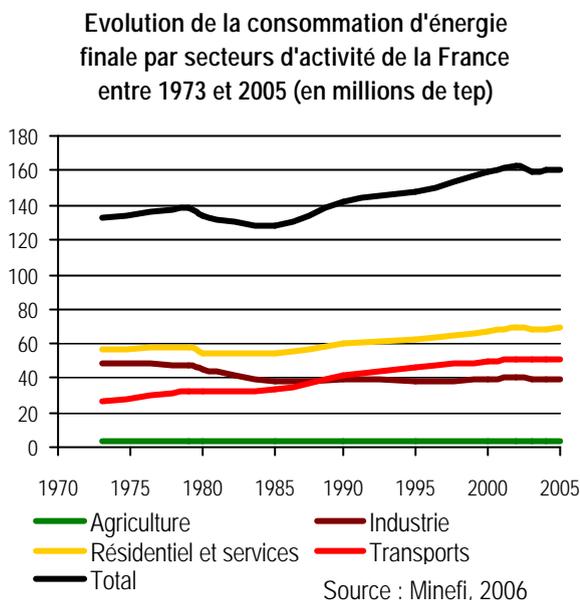
Indépendance énergétique totale et par forme d'énergie de la France depuis 1970 (en %)



Consommation d'énergies primaires (hors énergies renouvelables) par habitant pour les dix pays les plus riches en 2005 (en Tep)



(+92%). Le secteur « résidentiel et services » présente également une croissance soutenue bien que plus modeste (+21%). La consommation du secteur industriel est quant à elle marquée par une tendance nettement orientée à la baisse (-19%).



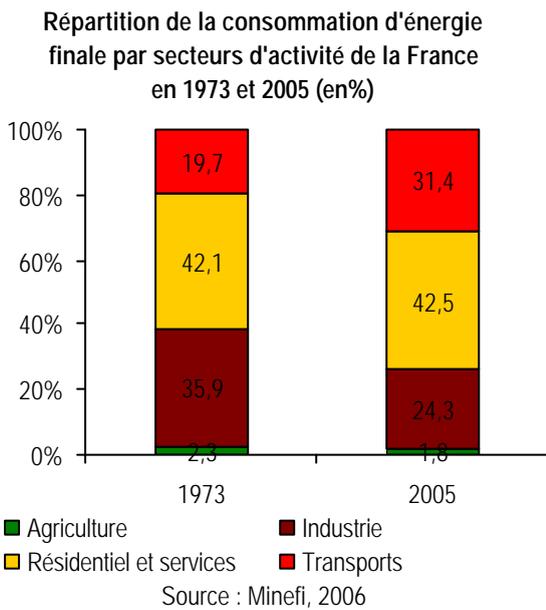
Ces évolutions traduisent la plus ou moins forte capacité d'adaptation des secteurs d'activités au contexte de chocs pétroliers des années 1970 et 1980. A la suite de réformes du cadre législatif – imposition de rendements minimaux aux chaudières industrielles, aides à la décision (diagnostics énergétiques), mesures fiscales favorisant les investissements destinés à économiser l'énergie – le secteur de l'industrie a généré les économies d'énergie les plus importantes. Bien que soumis lui aussi à des réglementations thermiques plus contraignantes, le secteur « résidentiel et services » n'a pu faire mieux que modérer le rythme de croissance de sa consommation d'énergie. Le secteur des transports apparaît quant à lui comme le plus hermétique à la question des économies d'énergie, la croissance constante des trafics et les difficultés de report modal vers les moyens de déplacements les plus économes constituant des

obstacles de taille. On considère que les politiques en la matière ont péché par absence d'approche globale : les véhicules ont bien fait l'objet eux aussi d'un durcissement de la réglementation sur le plan de la consommation maximum de carburant aux 100km, mais celui-ci s'est accompagné du maintien de politiques favorisant les déplacements individuels et l'habitat dispersé, lequel a finalement annulé le bénéfice des premières mesures (CES, 2006).

Par ailleurs, on observe que ces évolutions sectorielles de la consommation d'énergie finale en France diffèrent sensiblement de celles relevées à l'échelle mondiale. Plus précisément, depuis les années 1990, on observe en effet que : le taux de croissance annuel de la consommation d'énergie finale est nettement plus élevé à l'échelle mondiale qu'à l'échelle de la France (+2,9% sur la période 1990-2001 contre +0,8% sur la période 1990-2005) ; c'est la consommation du secteur des transports qui est la plus dynamique en France (+1,3% par an entre 1990 et 2005) alors que c'est le secteur « résidentiel et services » qui accroît le plus sa consommation d'énergie à l'échelle mondiale (+5,1% par an entre 1990 et 2001) ; le secteur industriel voit sa consommation d'énergie stagner en France (+0,1% par an entre 1990 et 2005) alors que celle-ci connaît une croissance encore vigoureuse à l'échelle mondiale (+1,5% par an entre 1990 et 2001).

Dès lors la répartition de la consommation d'énergie finale de la France selon les secteurs d'activité se distingue de celle constatée à l'échelle mondiale. Si le secteur « résidentiel et services » apparaît bien aux deux échelles comme le plus consommateur, son poids, bien que stable depuis entre 1973 et 2005 (42% environ), est plus élevé en France. Les

transports sont quant à eux devenus le deuxième secteur le plus consommateur d'énergie (sa part est passée de moins de 20% en 1973 à plus de 30% en 2005), alors que c'est le secteur industriel qui tient cette place à l'échelle mondiale. Ce dernier secteur a vu en effet son poids dans la consommation d'énergie finale de la France baisser de 36% à 24% entre 1973 et 2005).

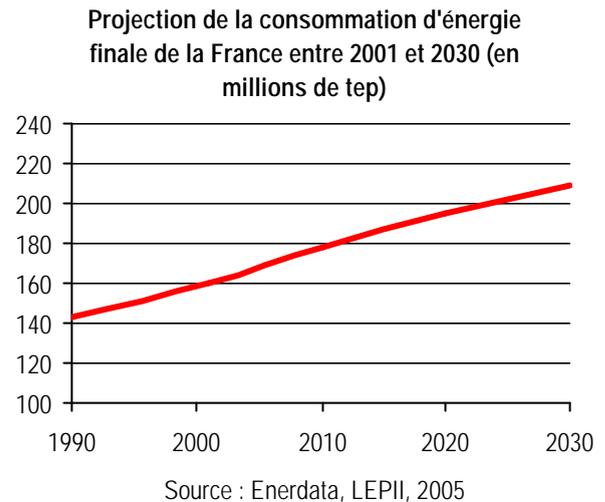


⇒ *En l'état des tendances, la consommation d'énergie finale de la France passerait de 160 à 209 millions de Tep entre 2001 et 2030*

Pour ce qui concerne le cas spécifique de la France, les projections à l'horizon 2030 effectuées par Enerdata et le Lepii (2005) pour le compte de la Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières du Ministère de l'industrie, de l'économie et des finances, montrent que la consommation d'énergie finale du pays, en tendance, progresserait de 160 millions de Tep en 2001 à 209 millions en 2030.

Ces projections s'inscrivent dans une perspective équivalente à celle du scénario tendanciel de l'AIE : un scénario de prospective où la demande d'énergie évolue dans le futur conformément aux

tendances du passé et où aucune politique nouvelle n'est adoptée au delà des engagements déjà adoptés (protocole de Kyoto, directives européennes...). Les données de cadrage retenues sont les suivantes : une croissance du PIB de 2,3%/an, sur l'ensemble de la période 2002-2030 ; une population passant de 61,1 millions d'habitants en 2010 à 63,9 millions d'habitants en 2030.

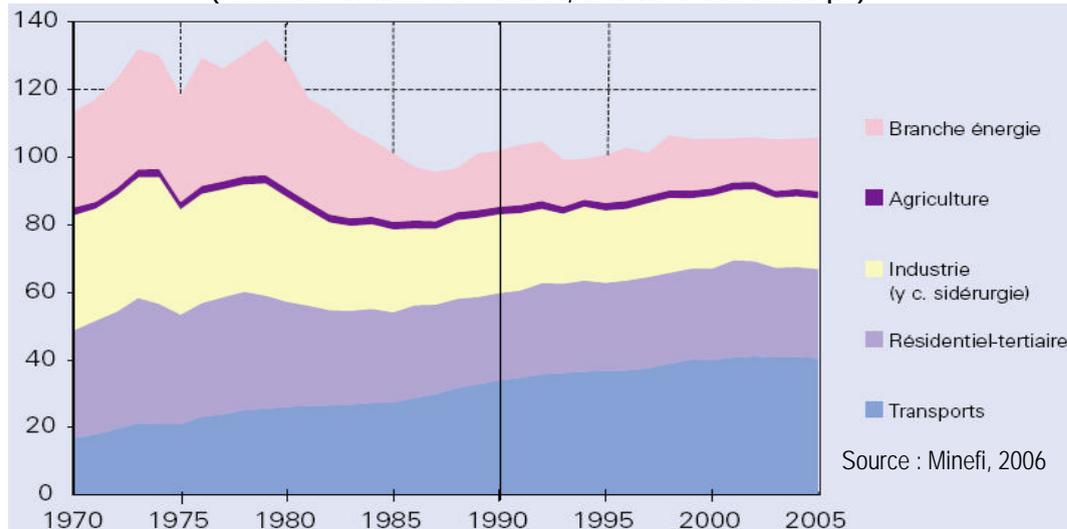


L'évolution des émissions de dioxyde de carbone de la France

⇒ *Les émissions de dioxyde de carbone liées à la production et à la consommation d'énergie de la France se réduisent*

A l'inverse de la tendance mondiale, les émissions annuelles de CO₂ de la France liées à la production et à la consommation d'énergie ont baissé depuis le début des années 1970 pour se stabiliser depuis la fin des années 1990 à 105 millions de tonnes environ, alors même que la consommation française d'énergie primaire s'est accrue de 55% sur la période 1973-2005 (Minéfi, 2006).

**Evolution des émissions de CO2 dues à l'énergie en France
(en millions de tonnes de carbone, avec correction climatique)**

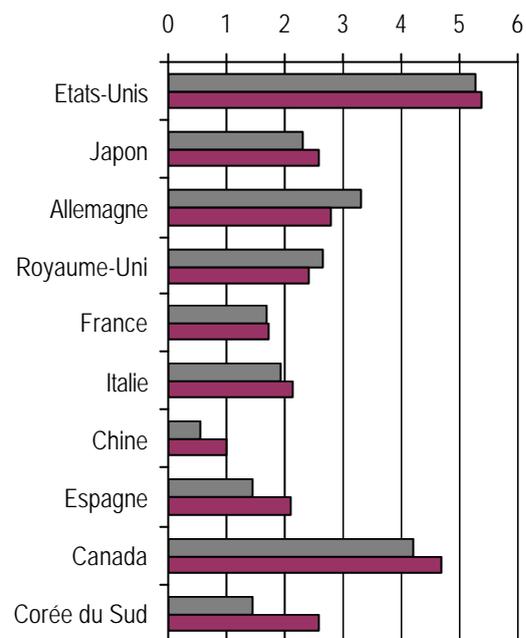


⇒ La France a le mode de production et de consommation d'énergie le moins émetteur de CO2 des pays riches

Si l'on observe les émissions de CO2 liées à la production et à la consommation d'énergie par habitant de chacun des dix pays les plus riches du monde (par le niveau de PIB en 2004) pour les années 1990 et 2004, on constate que la France est le plus vertueux avec « seulement » 1,7 tonnes par français.

La Chine présente certes un niveau d'émissions par habitant nettement inférieur à celui la France, mais ceci s'explique d'abord par la « modestie » de sa production de richesses par rapport à la masse de sa population. On constate par ailleurs que la majorité des pays considérés a vu ce ratio augmenter depuis 1990 alors qu'il reste stable pour la France.

Emissions de CO2 dues à l'énergie par habitant dans les dix pays les plus riches en 1990 et 2004 (en tonnes)



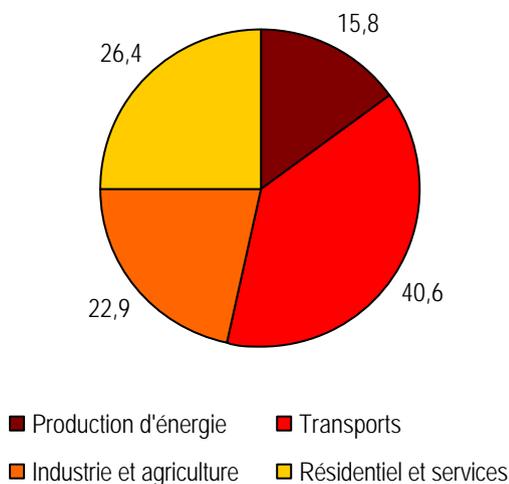
Source : Minefi, 2006

⇒ Une tendance à la baisse fragilisée par l'augmentation des émissions du secteur des transports et du secteur « résidentiel et services »

Cette tendance à la baisse des émissions de CO2 liées à la production et à la consommation d'énergie de la France – réduction de 17% entre 1980 et 2005 – est largement liée au recul des émissions de CO2

dans les secteurs de la production d'énergie (-58%), de l'industrie et l'agriculture (-31%) et, dans une moindre mesure, du « résidentiel et services » (-15%). Le développement très important en France de la filière nucléaire pour la production d'électricité durant les années 1970 et 1980 a permis de réduire fortement la contribution des centrales thermiques fonctionnant avec des combustibles fossiles (10% de la production électrique française en 2004).

Répartition des émissions de CO2 dues à l'énergie par secteurs en France en 2005 (en millions de tonnes de carbone)

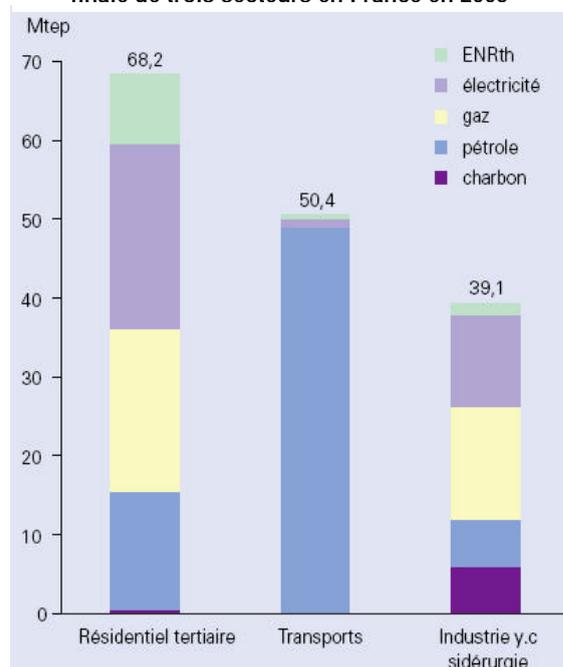


Source : Minefi, 2006

La réduction des émissions du secteur industriel est liée à la chasse au gaspillage d'énergie et à l'électrification de certains usages entrepris par les acteurs de l'industrie à la suite des chocs pétroliers. Les ménages et les entreprises de services ont eux-aussi entrepris des économies d'énergie au sein du logement, des bureaux, des locaux commerciaux avec l'envolée des prix du pétrole. Mais l'évolution de leurs émissions est à relativiser dans la mesure où celle est repartie à la hausse depuis les années 1990 ; plus de la moitié de l'approvisionnement de ce secteur repose en effet sur les combustibles fossiles. Le secteur des transports a quant à lui connu une très forte croissance de ses émissions

de CO2 (+55%) entre 1980 et 2005. Cette évolution s'explique par la conjonction de deux éléments : d'une part, le transport de personnes et de marchandises repose essentiellement sur la mobilisation des modes routiers – véhicules particuliers et utilitaires – et, d'autre part, les modes routiers sont dépendants du pétrole dans la mesure où il n'a pas été possible jusqu'ici de substituer à ce dernier une autre source d'énergie aussi efficace pour cette utilisation. Les transports routiers représentent de fait la plus grande partie des émissions imputées au secteur des transports. Au total, en 2005, ce sont désormais les secteurs des transports et du résidentiel et des services qui contribuent le plus aux émissions de CO2.

Composition de la consommation d'énergie finale de trois secteurs en France en 2005



Source : Minefi, 2006

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