



HAL
open science

L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique

Bernard Multon

► **To cite this version:**

Bernard Multon. L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique. La Revue 3E.I, 1998, pp.29-38. hal-00674076

HAL Id: hal-00674076

<https://hal.science/hal-00674076>

Submitted on 24 Feb 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique.

Bernard MULTON

Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan

1- Introduction

La terre reçoit, à un rythme assez régulier, une grande quantité d'énergie principalement grâce au rayonnement du soleil mais également, dans une moindre mesure, de son noyau en fusion et de l'interaction gravitationnelle avec la lune. Une partie de cette énergie est "dégradée" à la surface de la terre par les cycles naturels météorologiques, une autre partie –plus faible– est utilisée par les êtres vivants –flore et faune– dont les humains. Ces derniers ont, depuis quelques décennies, atteint un tel niveau d'activité qu'ils produisent de la chaleur à grande échelle par la combustion des carburants fossiles, de la biomasse mais aussi des combustibles nucléaires (la consommation totale d'énergie représente environ 1/6000^{ème} de l'énergie rayonnée au sol par le soleil). Si l'on considère en outre les émissions de gaz correspondantes comme celle de dioxyde de carbone, l'humanité en très forte croissance commence à représenter un élément très perturbateur de l'écosystème, qui risque de rompre un équilibre très subtil dont nous connaissons mal les capacités d'adaptation... Rappelons qu'actuellement, seule une faible proportion des êtres humains (environ 20%) –celle des pays industrialisés– dissipe à elle seule les trois quarts de l'énergie convertie par les activités humaines. Que se passera-t-il si toute l'humanité atteint –et elle y prétend légitimement– ce niveau de consommation ? Inexorablement, selon une loi de diffusion classique en physique, les différences de niveau de vie s'équilibrent entre les pays riches et pays en voie de développement et il va devenir nécessaire d'optimiser sérieusement notre consommation d'énergie par habitant. Surtout il faut apprendre à ne plus la gaspiller si nous voulons conserver notre niveau de confort d'habitant favorisé des pays fortement industrialisés. Autant que possible, il faut utiliser le plus directement possible ce que l'on reçoit de la nature avant de tout transformer en électricité par exemple. C'est dans ce contexte que l'on peut s'interroger sur les nouvelles habitudes qu'il serait bon de prendre.

De 1950 à nos jours, tandis que la demande d'énergie primaire (énergies fossiles, nucléaire et renouvelables, pas l'électricité produite à partir de chaleur) a quadruplé, la consommation d'électricité a été multipliée par 12. La proportion de l'énergie traitée électriquement a sensiblement été multipliée par 3. Actuellement, 25% de l'énergie primaire mondiale est consommée pour faire de l'électricité et l'énergie électrique représente environ 12% de l'énergie totale mise en oeuvre, ces proportions sont respectivement d'environ 50% et 20% en France. L'électricité semble un excellent vecteur d'énergie, en effet, les différents processus de traitement et de conversion de l'énergie électrique

peuvent se faire avec un très bon rendement et avec une très grande facilité de contrôle et de régulation, c'est d'ailleurs ces qualités qui ont contribué à son inexorable progression depuis cent cinquante ans. Mais il faut savoir produire l'électricité "proprement" et avec un bon rendement, enfin, il devient impératif de l'utiliser à bon escient.

Dans cet article, nous proposons d'essayer de faire le point sur les ressources en énergie de la terre et sur la façon dont elles sont utilisées (chapitre 2). Dans le chapitre 3, nous mettons en évidence la place de l'énergie électrique et les diverses ressources permettant de la produire plus "proprement". La répartition de la consommation d'électricité selon les domaines est également décrite.

Remarque : les chiffres donnés peuvent être sujet à des variations selon les sources. De nombreux recoupements ont été effectués de façon à maximiser leur crédibilité et à s'affranchir des nombreuses erreurs rencontrées (facteurs 10³ et 10⁶).

2- Les ressources en énergie de la planète terre et la consommation

2.1- Unités et équivalences

L'une des difficultés que l'on rencontre, lorsque l'on fait une telle analyse est la multiplicité des unités d'énergie utilisées (tonnes équivalent pétrole, TWh, exajoule EJ...). Afin de faciliter la compréhension, il nous a semblé que l'unité, dont la dimension est la plus "humaine" pour un électricien, était le kWh (kilowatt-heure) ! C'est donc celle qui sera utilisée dans tout l'article.

Quelques équivalences utiles lorsque l'on veut analyser les nombreuses données disponibles dans différents secteurs :

1 Wh = 3600 J (1 TWh = 10 ¹² Wh, 1 EJ = 10 ¹⁸ J)
1 t.e.p. ≅ 11 600 kWh (tonne équivalent pétrole)
1 baril (159 l ou 140 kg) ≅ 1700 kWh
1 BTU (British Thermal Unit) ≅ 252 cal ≅ 1050 J
1 quad BTU : 10 ¹⁵ BTU = 290.10 ⁹ kWh

Les valeurs énergétiques moyennes des principaux combustibles sont données dans le tableau 1 :

hydrogène	gaz naturel	GPL	charbon	fuel	essence	bois	uranium naturel
39 kWh/kg	17 kWh/kg 11 à 12 kWh/m ³	19,7 kWh/kg	7,2 kWh/kg	11,6 kWh/kg	12 kWh/kg	2 à 4 kWh/kg	116 000 kWh/kg

Tableau 1

2.2- Les ressources

Énergies renouvelables

L'énergie solaire

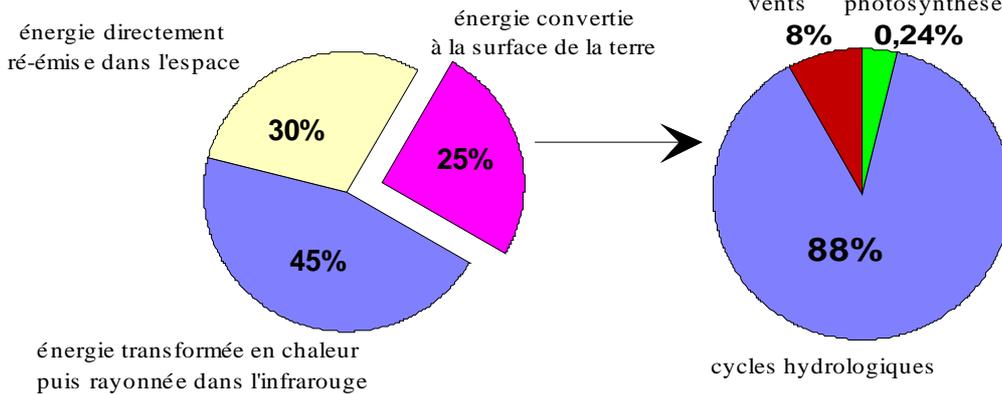
La surface de la terre reçoit chaque année 1,6 10¹⁸ kWh (équivalent à une puissance continue de 180 10⁶ GW), 30% sont directement réfléchis dans l'espace, 45% sont absorbés, convertis en chaleur et rayonnés dans l'infrarouge. Les 25% restant alimentent les cycles hydrologiques (24%) et la photosynthèse (0,06%) soit l'équivalent d'une moyenne de 45 10⁶ GW.

L'énergie rayonnée au sol vaut environ 720.10¹⁵ kWh. Selon les régions, l'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m², de 1100 kWh à 2300 kWh/an, soit une puissance moyenne (répartie sur l'année, en tenant compte des alternances jour-nuit et

des périodes nuageuses) de 120 à 260 W par m² et une puissance crête de plus d'1 kW/m². Cette énergie peut être directement transformée en chaleur avec un excellent rendement ou, encore, en électricité mais dans des conditions nettement moins bonnes. Une partie de cette énergie sert à la **photosynthèse : 950.10¹² kWh**, ce qui conduit à la production lente de matières **combustibles** comme **le bois ou les fossiles** (charbon, pétrole, gaz naturel). Les combustibles fossiles à la différence du bois sont le fruit d'une longue accumulation et ne peuvent être considérés comme renouvelables. Il aura fallu des dizaines de millions d'années pour

constituer les réserves de combustibles que nous aurons mis moins

de deux siècles à consommer....



Répartition des $1600 \cdot 10^{15}$ kWh reçus annuellement du soleil par la terre

Le soleil

45% de l'énergie rayonnée par le soleil tombe sur les mers tropicales, la différence de température entre les eaux de surface (23°C) et les eaux des profondeurs (-6°C à 1000 m) peut être utilisée, par exemple, pour actionner des moteurs thermiques. Les ressources "thermique-mer" représentent un potentiel de $8 \cdot 10^{12}$ kWh.

Sur les $720 \cdot 10^{15}$ kWh du rayonnement solaire reçu au sol, la part qui semble exploitable atteint $26 \cdot 10^{15}$ kWh annuels, ce qui suffirait très largement à satisfaire nos besoins (environ 0,5% de cette quantité, voir chapitre 2.3).

Les cycles hydrologiques représentent $370 \cdot 10^{15}$ kWh. L'évaporation de l'eau (principalement des océans) conduit à des précipitations canalisées ensuite par les rivières et les fleuves et également aux vents. Les vagues provoquées par le vent constituent également une source d'énergie exploitable. Les orages ne représentent qu'une faible partie de cette énergie qu'il est d'ailleurs quasi-impossible d'utiliser compte tenu de son caractère très impulsif et chaotique.

L'énergie hydraulique est utilisée de longue date ; au Moyen Âge, les moulins à eau constituaient la principale source d'énergie pour l'industrie. Aujourd'hui, l'énergie hydraulique est la principale énergie renouvelable utilisée pour la production d'électricité. L'énergie hydraulique techniquement exploitable, d'après [Web_LANL], vaut $25 \cdot 10^{12}$ kWh ($15 \cdot 10^{12}$ kWh, d'après [CHAB_EU97]), soit environ 5 à 8 fois ce qui est déjà exploité. Le potentiel est déjà bien utilisé dans les pays de l'OCDE mais il peut encore se développer dans nombre de pays en voie de développement.

L'énergie éolienne est également exploitée depuis longtemps, la propulsion à voile des bateaux, les moulins à vent et les pompes à eau de nos campagnes en sont les principaux témoignages. Les ressources exploitables mondialement sont énormes et sont estimées [Web_LANL] à $1 \cdot 10^{15}$ kWh/an. En France, sur les côtes, la réserve est de 4 à 6000 kWh/m², en plaine, on obtient de 300 à 1000 kWh/m² (la surface comptée est celle de l'hélice face au vent, axe horizontal). Ainsi une hélice de 40 m de diamètre brasse 1200 m² et produira, sur un site à 1000 kWh/m², environ $1,2 \cdot 10^6$ kWh par an. Le gisement éolien français est estimé à $60 \cdot 10^9$ kWh. [EDF_sept97] soit 13% de la production actuelle d'électricité.

La houle offre une puissance d'environ 50 à 80 kW par mètre linéaire de front de vague. L'un des problèmes est de construire des dispositifs capables de résister aux tempêtes. D'après [CHAB_EU97], l'énergie des vagues disponible est de $700 \cdot 10^9$ kWh dont $87 \cdot 10^9$ kWh/an techniquement utilisables.

La biomasse et la vie animale

Les énergies issues de la photosynthèse sont les plus anciennement utilisées. Les végétaux nous donnent la biomasse; le feu de bois est sûrement la plus primitive des sources d'énergie maîtrisées par l'Homme, il reste aujourd'hui une énergie essentielle dans les pays pauvres. La bagasse, déchet de la canne à sucre est une des variantes de la biomasse. D'après [Web_LANL], l'énergie qui peut être extraite

annuellement de la biomasse atteint $58 \cdot 10^{12}$ kWh. Les animaux de trait fournissent depuis longtemps de l'énergie pour les travaux agricoles mais également pour l'entraînement de pompes d'irrigation ainsi que d'autres dispositifs. Enfin, la biomasse moderne —les ordures ménagères— est aujourd'hui de plus en plus exploitée pour faire de la chaleur ou de l'électricité. Notons enfin que la vie animale consomme une quantité d'énergie non négligeable. Les 5,7 milliards d'êtres humains consomment "biologiquement" $3 \cdot 10^{12}$ kWh, soit l'équivalent de 2,5% de l'énergie qu'ils dégradent dans leurs diverses activités et environ 0,3% de l'énergie utilisée pour la photosynthèse.

La géothermie

Le noyau terrestre en fusion dégage une énergie correspondant à une puissance estimée à 35 000 GW soit une énergie annuelle de $300 \cdot 10^{12}$ kWh. Selon les lieux, le flux géothermique varie de 0,05 à 1 W/m², ce qui est très faible par rapport au rayonnement solaire. Les réserves exploitables sont d'environ $26 \cdot 10^{12}$ kWh en haute énergie (150 à 350°C, utilisée pour la production d'électricité) et $280 \cdot 10^9$ kWh en basse énergie (50 à 90°C pour le chauffage). La croissance prévue est très forte : coefficient 20 à 100 durant la prochaine décennie.

Le couple terre-lune

L'interaction terre-lune a, en particulier, comme effet les marées. L'énergie annuelle marémotrice représente environ $25 \cdot 10^{12}$ kWh. Une faible partie est utilisable dans les zones à forte marée présentant un étranglement, on l'estime [Web_LANL] à $270 \cdot 10^9$ kWh ou $500 \cdot 10^9$ kWh [CHAB_EU97] (l'usine de la Rance produit annuellement : $0,54 \cdot 10^9$ kWh).

Le tableau 2 montre un bilan des énergies renouvelables exploitables [Web_LANL et REE_sept97]. Le tableau 3 montre une prévision d'évolution de l'exploitation de quelques sources renouvelables d'énergie..

Énergies "épuisables" (voir tableau 4)

Il s'agit, en supposant qu'à notre échelle temporelle, le soleil et le noyau terrestre sont des sources inépuisables d'énergie, les carburants fossiles créés durant des millions d'années par la photosynthèse donc le soleil sont épuisables. En un peu plus d'un siècle, nous aurons brûlé une grande partie de ces réserves. L'uranium utilisé dans les réactions de fission nucléaire est également épuisable. Depuis 1970, nous avons doublé notre consommation de pétrole. Le pétrole représentait alors 45% de l'énergie consommée alors que cette proportion est tombée à 38% aujourd'hui et semble se stabiliser dans les années à venir.

Attention les durées sont très hypothétiques : réserves connues et rythme actuel de la consommation... Mais les prospections continuent et, chaque année, on enregistre une augmentation d'environ 1% des réserves exploitables. Dans ces conditions, nous disposons d'une durée limitée d'exploitation de ces énergies qu'il est difficile d'évaluer objectivement. Il est ainsi très probable que nous aurons épuisé les énergies fossiles durant le XXI^{ème} siècle.

Bilan du potentiel exploitable des énergies renouvelables (principalement d'après [Web_LANL]) :

Sources	rayonnement solaire	biomasse	vents	vagues	hydraulique	géothermie	marée
énergie exploitable	26.10 ¹⁵ kWh	58.10 ¹² kWh	1.10 ¹⁵ kWh	25.10 ¹² kWh	25.10 ¹² kWh	26.10 ¹² kWh	270.10 ⁹ kWh

Tableau 2

Prévision de l'évolution de l'exploitation des " nouvelles " énergies pour la production d'électricité de 1997 à 2000, (consommation totale mondiale 1997 ≅ 120.10¹² kWh [Web_EIA] et [CHAB_EU97]) :

Source d'énergie renouvelable	10 ⁹ kWh en 1997	% de la consommation mondiale en 1997	10 ⁹ kWh en 2000 (prévision)	% de la consommation mondiale en 2000
éoliennes	6 à 9	0,006% à 0,009%	14	0,013
géothermie électrique	55	0,046	126	0,1
marémotrice	0,4	0,0004%	?	?
solaire direct	2 à 3	0,0025%	?	?

Tableau 3

Réserves prouvées exploitables et totales estimées [Web_IFP et CEA] d'énergies fossiles et d'uranium [Web_CEA et LANL] :

Sources d'énergie épuisable	Pétrole	schistes bitumeux	gaz naturel	charbon
réserves exploitables	1,8 à 2.10 ¹⁵ kWh	2. 10 ¹⁵ kWh	1,2.10 ¹⁵ kWh	8.10 ¹⁵ kWh
réserves totales estimées	4.10 ¹⁵ kWh			40. 10 ¹⁵ kWh
durée d'exploitation au rythme années 90	40 ans	? ?	60 ans	200 ans

Tableau 4

2.3- Consommation

Consommation d'énergie dans le monde

Toutes activités humaines confondues, on estime la **consommation mondiale** [LATY_IEEE97 et Web_EIA] à **120.10¹² kWh/an** soit l'équivalent d'une puissance permanente d'environ **3 kW** par personne (**72 kWh/jour**). Ceci représente environ 1/6000^{ème} de l'énergie totale reçue à la surface de la terre ou encore 13% de l'énergie utilisée dans la photosynthèse, ce qui n'est pas vraiment négligeable ! En **Europe** (est et ouest), la consommation totale d'énergie vaut 78.10¹² kWh/an soit environ **150 kWh/hab/jour**. En **France**, cette consommation est de 2,6 10¹² kWh/an soit environ **120 kWh/hab/jour**. L'homme " technologique " consomme cent fois plus que l'homme primitif et dix fois plus que l'homme " évolué " [Quid_98]. Environ **8%** de

l'énergie commerciale traitée par les humains est "**d'origine renouvelable**", cette proportion devrait rester sensiblement constante dans les 20 ans à venir [Web_EIA]. La part totale (commerciale et non commerciale) atteint, elle, 19% [CHAB_EU97].

En 1960, les pays en voie de développement consommaient 23% de l'énergie mondiale, en 1995, la proportion est passée à 30% et on estime qu'en 2020, elle sera de 42%. Selon une des évaluations les plus optimistes, la consommation mondiale d'énergie devrait ainsi augmenter de 50% d'ici à 2020 (13,4 GTEP) [REE_mars96] :

Accroissement de la consommation énergétique de 1995 à 2005

Asie sud-est	Asie du sud	Afrique+ Moyen Orient	Afrique subsahar.	Amérique latine	Europe OCDE	Amérique du nord	CEI	Japon, Austral. N. Zélande	Europe Centrale
+48%	+15%	+7,7%	+6,4%	+13,1%	+3,9%	+2,7%	+1,2%	+0,9%	0,4%

Tableau 5

Le tableau 6 donne l'énergie globale consommée (tous secteurs confondus) ramenée par habitant et par jour, l'énergie électrique totale consommée puis l'énergie électrique domestique également ramenées par habitant et par jour, selon les région :

pays/consom. par hab. par j.	USA	Canada	Chine	CEI	Japon	Norvège	France	Espagne	Monde
% de la consom. mondiale	24%	3,4%	9%	11,5%	5,8%		2,8%		100
kWh par habitant par jour	253	310	21	155	110	245	120	75	72
kWh électriques par hab. par j.	28	48	2,1	12	21	61	20	11	2,3
kWh électriques domestiques	10	16	?	?	5,3	22	6,2	3,4	?

Tableau 6

Répartition de la consommation mondiale par source d'énergie primaire (vu la difficulté d'extraction de ces données, l'incertitude est élevée, sauf pour la France) :

source	pétrole	charbon	gaz naturel	nucléaire	hydraulique	renouvelables
% de la consom.mondiale 1970 [Web_EIA]	48%	28%	18%	<1%	X	6-X%
% de la consom. mondiale 1997 [Web_EIA]	39%	26%	21%	6	3	5
% de la consom. mondiale 2000 (prév) [quid_98]	25%	28%	22	9	8	6
% dans l'OCDE [Web_EIA]	40%	21%	22%	9	Y	9-Y%
% en France [quid_98]	35,9%	6,5%	13,5%	34,4%	7,7%	2%

Tableau 7

Remarque : la production thermique d'électricité est faite avec un rendement d'environ 30% d'où le fort poids de l'énergie nucléaire en France dans la consommation primaire. Globalement, la production d'électricité représente environ 29% de la consommation d'énergie primaire totale au niveau mondial mais seulement 12% de l'énergie finale est utilisée sous forme électrique.

Au niveau mondial, 45% du charbon est brûlé pour la production d'électricité, 27% dans l'industrie et la sidérurgie, 10% dans les foyers domestiques. Le pétrole n'est pas utilisé uniquement pour la production d'énergie, environ 500 millions de tonnes sont

utilisées annuellement pour des usages non énergétiques, dont 100 Mtep pour la fabrication des matières plastiques (polymères). En Europe, seuls 86% sont "brûlés" pour le transport et la production d'énergie électrique des groupes auxiliaires (secours et heures de pointe dans le secteur industriel).

Dans l'ensemble des pays industrialisés, les automobiles sont responsables de plus de la moitié de la consommation de pétrole [PLS_0197]. Le parc automobile mondial en 1997 est de 600 millions de véhicules dont 190 aux USA.

Répartition de la consommation d'énergie primaire par "secteur" au niveau mondial :

secteur	production d'électricité	Transports	Industrie	Résidences et bureaux
%	29%	16%	25%	26%

Tableau 8

Source d'énergie dans les différents secteurs :

poste/source	pétrole	charbon	gaz naturel	électricité	autre
Transports	96%	4%	--	--	--
Industrie	17	31	18	17	17
Résidences/bureaux	19	14	19	14	34

Tableau 9

Répartition de la consommation d'énergie primaire par processus en Suisse :

processus	chauffage	travail mécanique	chimie	éclairage
%	71%	26%	2%	1%

Tableau 10

Énergie consommée par km et par voyageur :

Mode de transport	Automobile 2 pers.	Autocar	TGV	Petit avion courte distance	Gros avion trajet intercontinental
en gramme équiv.pétrole	35	20	17	170	30

Tableau 11

La part du **chauffage** dépend énormément de la situation géographique ainsi la facture énergétique des pays nordiques est-elle plus lourde que celle des pays méditerranéens.

Transports

Se déplacer nécessite de vaincre des forces de frottement (aérodynamiques à haute vitesse), comme les moteurs utilisés sont rarement réversibles, les accélérations et les ascensions sont également coûteuses en énergie. La consommation d'une automobile est sensiblement proportionnelle à la masse déplacée, surtout en cycle urbain [MUL_95], alors que penser de la consommation de l'unique passager pesant 70 kg dans une voiture d'une tonne ? Le vélo est l'un des moyens de transport les plus économiques, en particulier, grâce à sa faible masse. Le transport aérien est le plus gourmand en énergie mais également le plus rapide, sur de longues distances, le déplacement à haute altitude dans un air raréfié est économique mais sur les courtes distances, l'énergie importante consommée au décollage représente une part élevée de la dépense totale. Donner des chiffres sur la consommation des différents modes de transport est une opération délicate. En effet, la consommation par passager dépend du taux de remplissage qu'il s'agisse d'une automobile ou d'un moyen de transport en commun, elle dépend également du type de trajet (urbain ou grande distance pour les transports terrestres, courtes ou longues distances pour les transports aériens où le décollage est coûteux en énergie). Malgré ces réserves, le tableau 11 donne

quelques chiffres de l'énergie consommée par voyageur au km parcouru pour le remplissage moyen rencontré.

Les transports représentent une très grande part (près de 25%) de la consommation énergétique de l'humanité et, c'est le pétrole qui est la principale source. Aussi, c'est certainement le domaine des transports qui sera le plus touché par les mutations que nous allons subir, le siècle prochain, dans le domaine de l'énergie.

Consommation d'énergie en France

Le tableau 12 montre la répartition de la consommation d'énergie selon les secteurs. On peut ainsi retenir, qu'en France, le secteur tertiaire et résidentiel consomme à lui seul près de la moitié l'énergie, que l'industrie en dépense un quart et que les transports utilisent le quart restant.

Le secteur des transports est, en France, le principal responsable des émissions de CO2, il utilise à lui seul la moitié des produits pétroliers. La répartition est la suivante [IFP] : transports terrestres : 500.10⁹ kWh, aériens : 60.10⁹ kWh, maritimes : 30.10⁹ kWh. Les transports urbains représentent 49% de la consommation de l'ensemble des transports terrestres (dont 55% par les voitures et 38% par les poids lourds). Notons que le transport annuel des 830 millions de tonnes de déchets (ménagers, industriels et agricoles) représente 4,5% de la consommation totale des transports de marchandises [LVDR_aout97]. Voir le tableau 13.

Répartition de la consommation totale d'énergie primaire en France (2,6.10¹² kWh) selon les secteurs :

Secteur	sidérurgie	Industrie	Résidentiel et tertiaire	Agriculture	Transports
% de l'énergie totale	3,8%	23,8%	45%	1,8%	25,5%

Tableau 12

Répartition de la consommation du secteur des transports terrestres en France par mode

Mode	Voitures	Camions	Bus	Ferroviaire	2 roues à moteur
% de l'énergie transport	56,4%	35,4	5,3%	1,5%	1,4%

Tableau 13

Consommation annuelle d'électricité domestique normale/économique

	eau chaude	éclairage	lave-vaisselle	réfrigération -congélation	sèche-linge	lave-linge	magnétoscope	téléviseur
kWh/an	2500	810/400	260/260	1000/365	480/420	240/170	120/20	240/160

Tableau 14

Habitat :

La consommation annuelle en électricité (hors chauffage et cuisine) d'une famille française de 4/5 personnes est répartie comme indiqué dans le tableau 14 [60M_97], on peut comparer la différence de consommation entre appareils ordinaires et économes.

L'énergie dépensée annuellement pour le chauffage dépend, nous l'avons vu, du climat, du type d'habitation (appartement, maison), de sa taille, de l'isolation thermique et des exigences des occupants. En France, la moyenne de la consommation énergétique annuelle pour un pavillon de 110 m² habitable bien isolé (construit après 1982), en région parisienne, est 11 000 kWh. En France, une variation de 1°C entraîne une variation de consommation d'électricité de 1200 MW (soit une tranche de centrale nucléaire) !

64% des logements français disposent d'un chauffage central individuel, 18% d'un chauffage central collectif et 18% d'un chauffage non centralisé. Les énergies utilisées (tertiaire compris) sont principalement le fuel (18 millions de tonnes en 96, soit 200.10⁹ kWh), le gaz (218 10⁹ kWh), le charbon (10.10⁹ kWh) et l'électricité (non différenciée). Notons que l'ensemble gaz-fuel-charbon consommé pour le chauffage représente (430.10⁹ kWh), à lui seul, plus que la totalité de l'énergie électrique consommée en France (400.10⁹ kWh en 96). On peut estimer que le chauffage des locaux représente près de 45% de l'énergie consommée par le secteur tertiaire et 20% de l'énergie totale consommée par la France. Ceci montre bien l'importance du chauffage des locaux dans un pays comme le nôtre.

2.4- Quelques alternatives aux carburants fossiles

L'énergie nucléaire semblait être la panacée dans les années 60. Aujourd'hui, on constate qu'elle nous a permis de franchir une période transitoire mais il est impensable de continuer à produire des déchets de fission à l'échelle planétaire. En outre, la construction de nouvelles centrales dans les pays industrialisés se heurte à une forte opposition des populations. La fusion, quant à elle, nous laisse un espoir qui ne fait que reculer et, dans l'hypothèse la plus optimiste, elle nous alimenterait en énergie à la fin du XXI^{ème} siècle... Il est ainsi indispensable de se préoccuper des autres alternatives.

Pour les besoins en chaleur, utiliser la chaleur rayonnée au sol par le soleil ou celle de la terre et, le cas échéant, brûler des combustibles renouvelables semble être une plus sage précaution pour l'avenir, même si cette combustion dégage des oxydes de carbone (ils sont recyclables !). Nous avons vu que la part du chauffage représentait une part importante de la consommation d'énergie, voici quelques exemples intéressants d'économie.

Chauffe-eau solaires :

La chaleur se stocke bien dans l'eau et nous en faisons l'expérience quotidienne avec les chauffe-eau électriques. Avec sa chaleur massique de 4180 J/kg/°C, 100 litres d'eau dont la température est accrue de 40°C ont accumulé 4,6 kWh d'énergie. Quelques m² de panneaux absorbants parcourus par de l'eau peuvent assez facilement stocker l'énergie nécessaire à la production d'eau chaude d'une famille, surtout si elle se trouve dans une région bien ensoleillée. C'est le cas dans les départements d'Outre Mer où EDF a lancé un programme d'installation de 20 000 chauffe-eau solaires qui conduit à l'économie annuelle de 10 000 tonnes de pétrole. Dans

ce cas, le producteur d'électricité a intérêt à cette opération car l'électricité lui coûte plus cher à la production qu'elle n'est facturée. A Besançon, dans un hôtel en zone urbaine moyennement ensoleillée (projections d'ombre d'autres bâtiments en hiver), une expérience de production d'eau chaude sanitaire (17 m² de capteurs) a été menée depuis 1993 (cofinancement ADEME) et a montré une production d'environ 400 kWh/m² par an.

Diverses expériences ont été faites sur des habitations prototypes pour tenter d'accumuler de la chaleur en grande quantité durant les périodes ensoleillées puis la restituer. En 1969, un ingénieur suisse (E. Schoenholzer) a proposé de stocker l'énergie thermique rayonnée par le soleil dans un réservoir de 6,4 m de diamètre sur 6,4 m de haut (206 m³) situé sous une maison, il devait permettre d'assurer les besoins en chauffage. D'autres expériences ont été menées avec un stockage de chaleur dans des roches. Actuellement ces dispositifs ne sont pas toujours rentables et posent encore des difficultés pour la régulation de température dans l'habitation mais les progrès sont rapides.

Géothermie :

La géothermie basse énergie (50 à 90°C) représente un important potentiel pour le chauffage domestique, les réserves mondiales annuelles sont estimées à 280.10⁹ kWh et 8300 MW sont déjà installés dont 1900 aux USA et 340 en France. Le mode d'exploitation proche de celui du pétrole (forage et pompage) est suffisamment économique pour être compétitif dans de nombreuses régions (Ile de France, Alsace, Aquitaine...). Son expansion est liée à l'évolution des coûts des carburants fossiles mais l'absence de rejets polluants du chauffage géothermique devrait le promouvoir fortement dans les prochaines décennies.

Chaufferie au bois :

A Moirans en Montagne, dans le Jura où le bois est abondant et où il est utilisé par l'industrie locale, une chaufferie automatique au bois de 2 MW a été installée (subventions ADEME) et en consomme 1300 tonnes (déchets de production) par an soit une économie 400 000 litres de fuel. Un complément au fuel permet de satisfaire les pointes, 95% de l'énergie est produite par le bois et 5% par le fuel. Le bois donne environ 2 kWh/kg.

Biomasse :

Brûler des végétaux (séchés et compactés) donne environ 2% de l'énergie qu'ils ont reçue durant leur croissance. Ce rendement est très faible mais le coût est également très faible. La bagasse (résidu de la canne à sucre après extraction du sucre) possède l'efficacité énergétique du lignite soit environ 2,2 kWh/kg (environ 5 fois moins que le pétrole), la Guadeloupe en produit annuellement 640 000 tonnes.

Incinération d'ordures :

Dans les pays industrialisés, l'incinération d'1 tonne d'ordures ménagères permet de produire 300 à 500 kWh. En région parisienne, la filiale spécialisée d'EDF, Tiru produit, annuellement, 250 MWh d'électricité et 4,5 Mt de vapeur pour le chauffage urbain en incinérant des ordures ménagères.

Pompes à chaleur :

Leur principe consiste à puiser les calories à une température éventuellement faible (air, eau, terre...) et à les transférer, par un procédé thermodynamique, au milieu à chauffer. Elles sont séduisantes dans le principe mais leur développement reste marginal. En France, il semble que l'investissement soit insuffisamment rentable car il faut disposer d'une source de chaleur suffisante, en général lorsqu'il fait froid.

L'hydrogène :

Il s'agit du gaz le plus disponible dans l'univers et sa combustion est la plus "propre", en effet, associé à l'oxygène comme comburant, on obtient de l'énergie et de l'eau. Il a donc le potentiel pour devenir le combustible idéal mais il pose encore de nombreuses difficultés techniques : il n'est pas facile à produire et encore moins à stocker. Le stockage peut se faire dans les trois états : gazeux comprimé à 200 bars, liquide à -253°C, sous formes d'hydrures (hydrogène combiné à des microbilles en alliage métallique) qui permettent de le stocker à l'état solide. Dans tous les cas, le réservoir reste coûteux, encombrant ou/et lourd. La production d'hydrogène est habituellement effectuée par réaction chimique en vaporisant de l'eau sur du coke à 1100°C mais elle peut également se faire par électrolyse. Dans le premier cas, il se produit des dégagements d'oxydes de carbone. Dans les régions ensoleillées, on envisage une production photovoltaïque, une telle installation expérimentale a été réalisée en Bavière (pas très

ensoleillé !). Le rendement vaut 8% sur 3000 m² avec une puissance maximale de 278 kW, deux catalyseurs de 110 kW produisent 50 000 m³ d'hydrogène par an (En Arabie Saoudite, on pourrait obtenir une production 2,5 fois plus élevée). Le danger d'explosion inquiète souvent, il faut rappeler que l'essence présente un risque d'explosion encore plus grand lorsqu'elle est mélangée avec l'air. L'hydrogène permet, outre une combustion simple productrice de chaleur, la génération d'électricité dans une pile à combustible dont le rendement peut être élevé, ceci sans production de déchets indésirables. Ainsi, on peut envisager son utilisation pour la production de chaleur, pour les moteurs thermiques et pour la production d'électricité à haut rendement.

3- La place et le rôle de l'énergie électrique**3.1- La production et le transport**Production

On estime à **13.10¹² kWh** la production mondiale d'énergie électrique en 1996. Environ 30% de l'énergie mondialement utilisée (**120.10¹² kWh**) est consommée pour la production d'électricité. Celle-ci est, aux trois quarts produite, dans des centrales thermiques classiques et nucléaires. Compte tenu du faible rendement de la conversion thermomécanique, les énergies renouvelables, essentiellement hydrauliques, contribuent à la production d'environ 40% de l'énergie électrique mondiale.

Part des énergies primaires pour la production d'électricité [Web_EIA] :

énergie	pétrole	charbon	gaz naturel	nucléaire	renouvelables
Monde	9,5%	36,5%	16%	16 %	22%
OCDE	7%	35%	11%	24%	23%
Non OCDE	12,3%	38%	23,5%	6,5%	19,7%

Tableau 15

Répartition géographique de la consommation mondiale d'électricité en 1996 : 13.10¹² kWh

région	OCDE	USA	Japon	CEI	Chine	Allemagne	France
% de la consom. mondiale d'électricité	50%	24%	7,7%	9,5%	7,8%	4%	3,5%

Tableau 16

La combustion massive des carburants fossiles et de la biomasse est à l'origine d'une forte production de dioxyde de carbone (CO₂) qui, on est certain aujourd'hui, est responsable d'un accroissement de l'effet de serre. Ce dernier, beaucoup plus que la consommation élevée d'énergie à la surface de la planète, conduit à un réchauffement climatique progressif qui va conduire à des changements d'équilibre (désertifications, inondations...). L'utilisation de l'électricité, si elle est produite autrement que par combustion de carburants carbonés, peut largement contribuer à nous préserver de ce problème. La production par la fusion nucléaire, propre de ce point de vue, pose un autre problème, celui des déchets radioactifs...

Pour produire de l'électricité, la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel génère respectivement 1, 0,81 et 0,6 kg/kWh de CO₂. De ce point de vue la France peut se targuer de produire de l'électricité avec un minimum d'émission de CO₂ (au kWh produit : 7 fois moins que l'Allemagne et 11 fois moins que le Danemark).

Production française d'électricité en 1997 (dont exportation)

Moyen de production	thermique à flamme EDF+autres	thermique nucléaire EDF	total hydraulique EDF + autres
P _{Max} MW installée	17 700 + ?	61 500	23 300 + ?
W _{Max} TWh produite	20 + 19	375	63 + 7
% de la production française	8%	77%	15%

Tableau 17

La production totale française a été de 484 TWh en 1997 (457 EDF + 26 autres producteurs) dont 400 TWh pour la

consommation intérieure, la capacité totale de production d'EDF est de 103 GW. Pour la première fois, la consommation d'électricité intérieure a baissé en 1997 (environ 0,6% par rapport à 96), la raison évoquée par EDF est un hiver doux. Le tableau 17 donne la répartition de la production française en fonction des sources d'énergie.

La production thermo-mécanique : on chauffe de l'eau dans un "générateur de vapeur", la pression mécanique de la vapeur entraîne une turbine accouplée à un alternateur. Le combustible est de type fossile (charbon, pétrole, gaz) ou nucléaire, quelquefois renouvelable (bois...). C'est le procédé le plus fréquemment utilisé. Malgré l'excellent rendement des alternateurs, il conduit généralement à un immense gaspillage d'énergie car le rendement thermodynamique des turbines est d'environ 30%. Une tranche de centrale nucléaire produisant 1450 MW électriques nécessite une puissance thermique de plus de 4000 MW.

On assiste depuis quelques années, surtout dans les pays nordiques, à une évolution importante : la **cogénération**. La part de l'énergie transformée en chaleur est récupérée pour des installations industrielles ou domestiques (chauffage résidentiel). La filière nucléaire, actuellement fondée sur la fission, présente l'avantage de ne pas rejeter de CO₂ mais génère des déchets radioactifs dont la sécurité du retraitement et du stockage ne font pas l'unanimité. Il y a aujourd'hui environ 450 tranches nucléaires dans le monde. Seuls la France et le Japon produisent une très grande part de leur électricité selon ce procédé. Pour les prochaines années, il semble que ce soient les pays en fort développement qui s'orientent vers cette solution (Chine, Corée du Sud). Le coût de l'électricité nucléaire est a priori attractif, mais le prix du démantèlement et de la restauration des sites est mal connu ou mal évalué, il varie fortement et, selon les hypothèses les plus pessimistes grève le prix du kWh au point que l'énergie nucléaire ne serait plus compétitive. Le coût du kWh nucléaire en production serait de 21 centimes selon la DIGEC.

Actuellement, pour mieux amortir les sites (ou faire reculer l'échéance du démantèlement), on a fait passer la durée de vie de 25 à 40 ans par des opérations de maintenance accrues.

L'hydroélectricité est une solution extrêmement attractive qui est exploitée presque au maximum des possibilités dans les pays industrialisés. En France, plus de 90% des possibilités sont utilisées. Dans le monde : $2,5 \cdot 10^{12}$ kWh sont produits annuellement alors que l'on estime à $25 \cdot 10^{12}$ kWh la part exploitable. Les ressources sont inégales selon les pays, le Canada dispose de vastes ressources et la Norvège produit ainsi la totalité de son électricité (130 TWh). La plus grande centrale sur la frontière du Brésil et du Paraguay a une puissance de 12,6 GW. De nombreux pays en voie de développement étendent ce mode de production ; où actuellement 31% de leur électricité est produite hydrauliquement contre 17% dans les pays industrialisés.

En France, plus de 500 ouvrages sont exploités par EDF pour une puissance totale installée de 23 300 MW, 1400 autres centrales (1 à 900 MW) appartiennent à d'autres producteurs. Les centrales au fil de l'eau doivent se satisfaire du débit des cours d'eau, en revanche, les barrages permettent de stocker l'énergie et de la fournir dans les moments de forte demande. Dans certains cas des bassins de stockage haut et bas permettent d'effectuer un véritable stockage d'énergie. Par exemple, dans l'usine de Grand'Maison 2 bassins séparés de 935 m de dénivellée, d'une contenance de 170 Mm^3 permettent le stockage de $400 \cdot 10^6$ kWh, 12 groupes turbo-alternateurs de 150 MW fournissent des pointes de puissance de 1800 MW et 8 sont réversibles pour le pompage en période creuse.

Énergie marémotrice : Dans le monde, le potentiel d'énergie électrique marémotrice est d'environ $270 \cdot 10^9$ kWh. L'usine marémotrice de la Rance [REE_oct97] (24 groupes de 10 MW) produit annuellement $540 \cdot 10^6$ kWh. A elle seule, elle produit 91% de l'énergie électrique marémotrice mondiale et reste actuellement l'unique usine marémotrice au monde de taille industrielle. En 30 ans, elle a produit 16 000 GWh ($16 \cdot 10^9$ kWh). Le prix du kWh, toutes charges comprises, s'établit à environ 0,18 F ce qui est très rentable. Ce mode de production est appelé à se développer fortement dans le siècle prochain.

Éoliennes : Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes résistantes aux conditions météorologiques très variables et silencieuses. Aujourd'hui, ce mode de production se développe très rapidement. Pour les usagers non raccordés au réseau, il s'agit d'un mode de production très rentable, des petites centrales de 10 à 25 kW sont commercialisées pour les sites isolés. Une éolienne de 4,5 m de diamètre, dans une zone de plaine très moyennement ventée (300 kWh/m^2 par an soit une puissance moyenne de 35 W/m^2) fournirait la consommation d'électricité d'un foyer domestique (14 kWh par jour).

La production à grande échelle (turbines de quelques 100 kW) devient également rentable dans les zones suffisamment ventées. Actuellement, d'après [Web_Eole], 6800 MW éoliens sont installés dans le monde alors qu'il n'y en avait que 15 MW en 1981 et le marché atteindra 10 000 MW d'ici 2000. Le coût de revient actuel est de 30 à 40 centimes/kWh. En 1995, 27 000 éoliennes étaient installées dans le monde et plus de $7 \cdot 10^9$ kWh éoliens produits [Web_Eole]. Au Danemark, 640 MW sont déjà en service et fournissent 8% de la demande énergétique électrique nationale (objectif : 15% en 2005), ce pays produit d'ailleurs une grande part mondiale des turbines éoliennes. L'Allemagne dispose déjà d'une puissance éolienne de 1100 MW (la plus grosse éolienne : 1,5 MW 66 m de diamètre). Aux USA, principalement en Californie, 1700 MW sont en service. L'Espagne, la Hollande, le Royaume Uni et l'Italie ont déjà installé respectivement 385 MW, 250 MW, 200 MW et 25 MW. Au Maroc vers le détroit de Gibraltar, la centrale de Tétouan, qui vient d'être mise en service, met en œuvre 84 éoliennes de 600 kW (2% de l'électricité produite au Maroc). Et la puissance potentielle de la Chine est estimée à 250 000 MW !

Le potentiel français terrestre est de 66 TWh (20 GW) ce qui n'est pas négligeable (même ordre de grandeur que l'hydraulique), actuellement seulement environ 10 MW installés (2,2 MW à Port La Nouvelle et 3 MW à Dunkerque). Le potentiel offshore est estimé entre 80 (sur fonds de moins de 40 m et à moins de 10 km des côtes) et 500 TWh/an (moins de 30 km). La France, après avoir pris un certain retard sur ce plan, a lancé en 1996 le

programme ÉOLE 2005 dans lequel on prévoit l'installation de 250 à 500 MW d'éoliennes d'ici 2005 (soit 500 à 1000 éoliennes de 500 kW donc 50 à 100 par an). Dans ce cadre, EDF s'est engagée à racheter l'énergie éolienne à un prix moyen de 33,7 centimes par kWh pendant 15 ans. Les sites retenus pour la première tranche du programme (15 MW) sont : Widehem (Pas de Calais) : 4,5 MW, Donzère (Drôme) : 3 MW, Petit Canal (Guadeloupe) : 2,4 MW, Lastours (Aude) : 3,05 MW. Pour la seconde tranche, 16 sites ont déjà été retenus pour une puissance totale de 64,5 MW.

L'île de la Désirade en Guadeloupe est alimentée par une centrale éolienne (12 X 12 kW) et des générateurs diesel. Les éoliennes produisent de 25% (moyenne) à 50% des besoins, un passage à 500 kW permettra prochainement d'économiser 600 t de pétrole par an. Les éoliennes sont capables de résister à des cyclones (250 km/h) en se couchant.

Le potentiel mondial terrestre, estimé à 20 000 TWh/an, pourrait couvrir presque le double de la consommation électrique actuelle. Vers 2030, des prévisions optimistes prévoient 100 000 MW installés, 10 à 20% de la demande mondiale en électricité pourrait être satisfaite par le vent.

Solaire Photovoltaïque : Les cellules au silicium ont un rendement d'environ 12% et sont encore très coûteuses, le coût du kWh est estimé à environ 3 à 15 F (durée de vie 15 à 20 ans). Pour ces raisons, la production photovoltaïque est réservée aux sites isolés (dispositifs divers et habitat). En France, 2400 sites habités ont été équipés en 1996-97, l'usager subventionné ne supporte que 5% du coût d'installation. Actuellement, environ 500 MW (soit environ 10 millions de modules) photovoltaïques sont installés dans le monde [RIC_REEavr97], on en prévoit environ 1000 MW en 2000. Le rendement peut être amélioré (21,6%) grâce à des cellules à 2 couches InGaP et GaAs mais elles sont optimisées pour l'espace (spectre décalé vers le bleu) et, surtout, sont 4 fois plus chères que les cellules au silicium.

Solaire-thermique : On peut aussi utiliser la chaleur rayonnée par le soleil pour chauffer de l'eau et actionner des turbines comme dans les centrales thermiques. En France, la centrale Thémis dans les Pyrénées a permis de tester ce principe [RPA_89]. Un ensemble de 200 miroirs (rendement de 90%) à orientation pilotée dirigeaient le rayonnement solaire vers une tour de 100 m, dans une cavité de 56 m^3 . La puissance thermique de 9 MW conduisait à une puissance électrique de 1,8 MW. Le rendement est malheureusement plus faible quand le rayonnement solaire est insuffisant, en outre, la nécessité de maintenir la température du fluide (sels fondus) de l'échangeur, en l'absence de soleil, conduisent à un rendement net de l'ordre de 15%. Le coût du kWh produit ne s'est pas révélé compétitif et l'expérience n'a pas donné suite.

Géothermie : La géothermie haute énergie (150 à 350°C) permet de produire de l'électricité en transformant de l'eau en vapeur. Ainsi la puissance installée au monde était en 1995 de 6800 MW électriques (10 000 MW prévus en 2000) dont la moitié aux USA [Web_géoth, Quid_98]. 11 300 MW thermiques sont utilisés directement pour la production de chaleur. On prévoit une production électrique annuelle de $300 \cdot 10^9$ kWh au début du XXI^{ème} siècle, soit 12% de ce qui semble économiquement disponible. En France (Guadeloupe, Bouillante), la capacité de 4,2 MW reste marginale ; en Europe, l'Italie dispose d'une capacité de production de 632 MW en 95 avec la centrale la plus puissante du monde : 2 groupes de 60 MW.

Transport de l'électricité

Les **qualités** attendues de l'énergie sont sa **disponibilité**, ses possibilités de **stockage** et sa facilité de **transport** [AGUET_87]. Le charbon se transporte d'ordinaire par train ou par bateau, le pétrole (et le gaz) par bateau ou par pipeline (gazoduc), l'électricité par ligne haute tension. Ainsi une **voie ferrée** avec un train de 40 wagons toutes les 10 mn transporte **3000 tonnes de charbon par heure**, ce qui correspond à une puissance équivalente de **20 GW thermiques**. Un **oléoduc** de 90 cm de diamètre canalise **5000 tonnes de pétrole à l'heure** soit une puissance de **60 GW thermiques**. Une ligne électrique **735 kV** de 36 m de large transporte de **2 GW électriques**. Les câbles enterrés permettent, de point de vue, un gain considérable d'encombrement mais à un coût encore élevé, c'est, ici encore les pressions environnementales qui

pousseront probablement à leur utilisation. Plus tard, si la physique nous le permet, ce seront des câbles supraconducteurs qui transporteront l'énergie électrique avec un minimum de pertes et un maximum de compacité, mais il faudra encore attendre...

3.2- La répartition par processus de la consommation d'énergie électrique

L'industrie a consommé en 1995, en France, 122 TWh soit 31% de l'électricité totale et représente la part de la consommation d'énergie électrique en plus forte croissance, le **secteur résidentiel** a consommé 30% et le **secteur tertiaire** 23%.

D'après [OBER_JEE97], en 1993, 22 TWh ont été consommés par l'électrothermie industrielle (sur environ 390 TWh)

Répartition de la consommation industrielle de l'électrothermie en GWh 1993 :

processus	résistances	arc	électrolyse	chaudières à électrodes	induction	infrarouge	compres. Méca vap.	pompes à chaleur	autres
GWh	8428	4949	4500	1960	2074	367	249	298	740

Tableau 19

Les moteurs électriques : [ADEME_EEA97]

En France les moteurs électriques consomment 22% de la consommation totale d'électricité et 72% de la consommation industrielle soit 82 TWh en 1993. Le tableau 20 montre que les processus de compression, pompage et ventilation consomment près des deux tiers de la consommation énergétique de l'ensemble des moteurs du secteur industriel.

Répartition de la consommation industrielle des moteurs par usage :

compression	pompage	ventilation	autres
30%	20%	13%	37%

Tableau 20

La variation électronique de vitesse est un moyen de minimiser la consommation des processus grâce à une meilleure adaptation des caractéristiques mécaniques, le tableau 21 montre la répartition de la consommation dans le domaine des entraînements réglés électroniquement. Le réglage électronique est plus souvent utilisé lorsque l'on recherche la maîtrise des mouvements plutôt que pour l'économie d'énergie qu'il peut procurer. Il reste ainsi un important "gisement" d'économie dans le secteur des fluides (pompage, ventilation...). Actuellement 13% de l'énergie consommée par les moteurs "passe" par un variateur électronique et le marché potentiel restant est estimé à 52%.

Répartition de la consommation par usage des entraînements réglés électroniquement :

Entraînements mécaniques	agitateurs, mélangeurs	usinage	circulation de fluide	laminage	autres
30%	16%	15%	11%	8%	20%

Tableau 21

Répartition en nombre, en puissance installée et en consommation des 14 millions de moteurs industriels

Puissance en kW	< 1	1 à 4	4 à 10	10 à 30	30 à 70	70 à 130	130 à 500	> 500
nombre	50,5%	30,1%	11,9%	5,6%	1,1%	0,5%	0,2%	0,1%
puissance	4,8%	13,4%	16,3%	19,3%	10,6%	9%	11%	15,6%
conso	2,7%	8%	10%	17,3%	10,7%	9,6%	13,8%	27,9%

Tableau 22

Eclairage : Le rendement des dispositifs d'éclairage est généralement très faible, il dépasse difficilement les 7% avec l'incandescence, principe le plus utilisé pour l'éclairage domestique. Les dispositifs à décharge ont un rendement 4 fois plus élevé et avec un rendu de couleur qui atteint maintenant celui des lampes halogène. Le tableau suivant montre, compte-tenu de la durée de vie estimée et de la consommation sur 8000 heures, une comparaison entre 3 types d'éclairage pour une puissance "équivalente incandescence" de 60 W [Quid_98] :

soit environ 5,8% de l'énergie électrique totale et 18% de l'électricité industrielle. Le tableau 19 montre la consommation d'électricité dans les procédés de chauffage industriel en 1993.

Répartition de la consommation industrielle d'électricité [ADEME_EEA97, OBER_JEE97] :

Moteurs	Processus de chauffage	Eclairage	Divers
72%	18%	4%	6%

Tableau 18

Le tableau 22 donne la répartition en nombre, en puissance installée et en consommation des 14 millions de moteurs industriels [ADEME_EEA97] dans l'industrie française. Les moteurs de moins de 10 kW sont largement majoritaires en nombre (93%) mais ne consomment que 21% de l'énergie électrique à usage mécanique. Les gros moteurs de plus de 130 kW représentent seulement 0,3% du parc en nombre mais consomment plus de 40% de cette énergie. Au delà de 10 kW, 90% des moteurs sont des moteurs asynchrones, les autres sont encore souvent à collecteur.

Un moteur électrique industriel de 11 kW va consommer en 10 ans une quantité d'énergie correspondant à 100 fois son prix d'achat, d'où l'importance de maximiser son rendement.... De plus, 70% des moteurs fonctionnent plus de 5000 heures par an, il semble, a priori, très intéressant d'améliorer le rendement, le surcoût engendré par cette amélioration devrait pouvoir s'amortir en quelques années. C'est ainsi que nombre de fabricants proposent des moteurs dits haut rendement. Généralement, c'est pour une puissance proche du régime nominal que le rendement est amélioré. Par exemple, un moteur haut rendement optimisé pour la puissance maximale et qui fonctionne la grande majorité du temps à 50% de cette puissance, risque de consommer plus d'énergie qu'un moteur "standard" dont le rendement était a priori plus faible. De même, un moteur surdimensionné et fonctionnant à faible charge aura un rendement plus faible qu'un moteur de puissance plus faible et fonctionnant à son rendement maximal. On constate ainsi que la conception d'un moteur qui ne fonctionne pas à charge constante, même s'il est "simplement" alimenté par le réseau à tension et fréquence fixes, nécessite de connaître précisément son cycle de fonctionnement si l'on veut le concevoir pour minimiser sa consommation énergétique.

	Incandescence 60 W	halogène 50 W	fluocompacte 15 W
Coût achat	64 F	120 F	120 F
Coût énergie	350 F	292 F	87 F
Coût total	414 F	412 F	207 F

Tableau 23

Quelques “gisements” d'économies d'électricité :

Outre la vitesse variable, il existe de nombreux domaines dans lesquels il est possible de réduire la dépense énergétique soit en limitant le gaspillage soit en utilisant des dispositifs à rendement amélioré. En France, le secteur tertiaire consomme, à lui seul, 23% de la totalité de l'énergie électrique. Les éclairages et les ordinateurs sous tension en permanence représentent un gaspillage énorme... Dans le secteur industriel, l'ADEME estime qu'il est possible d'économiser **4,7 TWh** grâce à l'utilisation de la variation électronique de vitesse (dont 98% pour les opérations de circulation des fluides). L'utilisation de moteurs haut rendement permettrait un gain de 0,9 TWh soit une économie de 0,7%. Les pompes de chauffage central individuel, qui fonctionnent souvent en continu pendant la période d'hiver, consomment jusqu'à 700 kWh par an alors qu'un fonctionnement asservi permettrait de diviser la consommation par 10, des pompes à rendement amélioré contribueraient encore à réduire la facture. Et il en est de même pour les ventilations mécaniques.

Le coût de l'éclairage représente environ 15 à 20% de la facture électrique des ménages ; une économie de 0,6 TWh pourrait être obtenue (surtout dans le secteur résidentiel encore peu équipé) grâce à l'emploi de lampes haut rendement (“fluo-compactes”). Dans l'ensemble du secteur résidentiel (tableau 14), la facture d'électricité peut être réduite quasiment d'un facteur 2 simplement en utilisant des appareils plus économiques [60M_97, ECOD_98] dont l'amortissement s'effectue sur une durée comprise entre quelques mois et 5 ans. Il existe ainsi un gisement d'économie [ECOD_98] ne nécessitant aucune révolution technologique de **26 TWh** (6,5% de la consommation d'électricité nationale).

Les transports dépendent presque exclusivement des hydrocarbures et consomment plus du quart de l'énergie mondiale. Dans ce domaine l'électricité, outre l'absence de pollution atmosphérique directe, offre un bien meilleur rendement que nos vieux moteurs thermiques. Mais ce n'est pas, a priori, la recherche d'une baisse de consommation qui conduira au développement de véhicules électriques, à moins que le rendement ne soit pas évalué de la production d'électricité jusqu'à sa consommation finale... En effet, dans le contexte actuel de production principalement thermomécanique de l'électricité, le bilan énergétique global d'un véhicule tout électrique, alimenté par batteries, n'est pas à vanter. De même, un système hybride, même à pile à combustible, offre un rendement global plutôt faible. De ce point de vue, les automobiles électriques seront intéressantes si l'électricité est générée avec une production de chaleur minimale.

Dans le domaine des transports en commun, un projet de transport, tout à fait original et allant dans le sens d'un plus faible gaspillage, mérite d'être cité. Il s'agit du “Swissmetro”, c'est un train (reliant Genève à Zürich : métro à l'échelle de la Suisse) électrique à moteur linéaire et à sustentation magnétique circulant, à environ 500 km/h dans un tunnel à très faible pression (0,1 à 0,01 atm.) [JUF_94]. Les frottements aérodynamiques sont rendus minimales grâce au vide et la sustentation magnétique permet d'abaisser encore la consommation puisque la sustentation consomme environ 1,8 kW/tonne contre 7 kW/tonne pour un contact roue-rail fer-fer à 500 km/h. Ce projet a été initié en 1994 et c'est cette année (1998) que doit être prise la décision d'aller plus loin.

4- Conclusion

L'écosystème qui nous protège est extrêmement complexe, sûrement très adaptable mais il a des limites que nous ne connaissons pas. Il est devenu évident que le niveau d'activité atteint aujourd'hui par l'humanité constitue une perturbation que l'on ne peut plus négliger. Afin de la minimiser, il va devenir indispensable d'arrêter, d'une part, le rejet massif de polluants (gaz carbonique, déchets radioactifs...) et d'autre part, la production à grande échelle de chaleur qui ne nous soit pas donnée par le soleil ou par la terre. Le recyclage des matières premières devient également une nécessité. Du point de vue des rejets et de la production excessive de chaleur, la combustion des carburants fossiles et la fission nucléaire doivent être réduites. Même la fusion, qui semblait, pour beaucoup, la solution du siècle prochain ne

semble pas une voie saine ; car, outre le fait qu'elle pose des problèmes techniques encore loin d'être résolus, elle risque de conduire à une production d'énergie démesurée. Imaginons en effet que les 10 milliards d'habitants qui vivront au milieu du prochain siècle dépendent ce que consomme aujourd'hui chaque Américain (250 kWh par jour), la consommation humaine se chiffrerait à près de 10^{15} kWh soit 10 fois plus qu'aujourd'hui et environ 0,15% de la totalité de l'énergie reçue du soleil à la surface de la terre. Par ailleurs, selon la conférence internationale de l'énergie, la combustion d'hydrocarbures qui continuera, hélas, à représenter 75 à 80% de l'énergie utilisée par les activités humaines dans les 50 prochaines années continuera à accroître l'effet de serre dans l'atmosphère. La température moyenne devrait ainsi s'élever de 0,8 à 2°C en même temps que le niveau de la mer devrait augmenter de 20 à 80 cm.

Nous avons vu que la nature nous offre une quantité colossale d'énergie et nous avons choisi, jusqu'à maintenant, la solution de facilité héritée de nos ancêtres : le “feu”. Nous savons maintenant faire mieux et, si nous sommes raisonnables, il n'y aura pas de crise de l'énergie. Les énergies renouvelables et l'hydrogène produit à partir de ces dernières doivent nous permettre de satisfaire largement nos exigences. Il sera, d'un point de vue énergétique, possible d'offrir le niveau de confort actuel des pays les plus avancés à l'ensemble de la population, mais à deux conditions : l'optimisation de la consommation (minimisation du gaspillage et amélioration des rendements de conversion) et la production “propre” de l'énergie. Il est également important de varier au maximum les méthodes de production et de conversion de façon à limiter les conséquences économiques ou/et écologiques en cas de problème imprévu. Dans ce contexte, l'électricité a un rôle majeur à jouer et il n'y a aucune raison pour que l'expansion qu'elle a connue depuis le XIX^{ème} siècle ne cesse. On prévoit [PLS_nov95] un accroissement de la consommation mondiale d'énergie électrique de 260% de 1995 à 2025 (et +30% en combustibles fossiles).

La production d'électricité ne se fait avec un bon rendement, dans l'état actuel de la technologie, que lorsqu'elle est électromécanique. Dans un avenir plus ou moins proche, la pile à combustible (déjà utilisée dans le domaine spatial depuis longtemps) viendra peut-être changer la situation. La production photovoltaïque, encore coûteuse, est, malgré son faible rendement, à retenir si elle exploite le rayonnement solaire gracieusement fourni sans changer l'équilibre naturel de la planète.

Il est donc intéressant d'utiliser directement l'énergie mécanique reçue (hydraulique, éolienne, marémotrice, vagues...) pour en faire de l'électricité, cela permet de satisfaire une part très importante de nos besoins. On peut ainsi envisager de disposer de centrales de grande puissance comme les centrales hydroélectriques ou des fermes éoliennes mais également de petites centrales bien réparties à la surface de la terre au niveau des utilisateurs. Le principal problème qui se pose alors est l'irrégularité de cette production et, la difficulté bien connue de l'adaptation production-consommation prend des proportions encore plus grandes. Il devient alors plus que jamais indispensable de pouvoir stocker l'énergie électrique. Les réservoirs d'eau sont intéressants de ce point de vue mais cela ne suffirait pas, des accumulateurs d'énergie performants [MUL_96] constituent l'un des points clés d'un système de production réellement écologique.

Pour la production de chaleur “basse température”, dans la majorité des cas, on peut exploiter directement le rayonnement solaire et accumuler l'énergie dans de l'eau ou d'autres matériaux. La géothermie est également une solution attractive. Les cycles combinés de production électromécanique d'électricité conjointe à celle de chaleur (récupération des pertes de conversion du cycle thermodynamique) dans les centrales à turbines à vapeur est également une voie, déjà maîtrisée et intéressante, tout particulièrement lorsque l'on peut utiliser la chaleur sur place. Ce type d'installations constitue actuellement un marché en expansion. Pour une bonne exploitation de la surface de captation du rayonnement solaire, on peut concevoir des capteurs mixtes chaleur et électricité qui permettent d'utiliser au mieux la surface de captage. Enfin, lorsque les piles à combustibles auront atteint leur

maturité industrielle, on pourra également espérer effectuer une cogénération électricité chaleur à partir de l'hydrogène, à condition qu'il soit lui-même produit de façon propre et directement via le rayonnement solaire. Le méthanol pourra également constituer un carburant propre issu de la biomasse.

Pour franchir en douceur les différentes étapes de cette mutation indispensable, il faut une volonté politique. La fiscalité et les aides publiques sont un bon moyen d'aider à promouvoir des systèmes forcément plus coûteux que ceux qui bénéficient de décennies voire de siècles d'amélioration et d'optimisation économique. Ainsi, en 1998, aux USA, le gouvernement incite aux économies d'énergie grâce à des subventions importantes : 4000\$ par véhicule à haut rendement, 2000\$ par système à cellules photovoltaïques et 1000\$ par chauffe-eau solaire. C'est ainsi que la production éolienne d'électricité est en très forte croissance, car de nombreux pays au monde ont choisi de promouvoir cette filière qui n'était pas compétitive au départ mais qui est en train de le devenir grâce à la baisse des coûts engendrée par la fabrication en grande quantité de tels équipements. Enfin, le prix de vente de l'énergie devra (plus qu'aujourd'hui !) prendre en compte le coût des conséquences de la production (retraitement des déchets, pollution...).

A long terme, il me semble qu'il serait intéressant de disposer d'un réseau d'énergie électrique mondial largement interconnecté (peut-être, en courant continu pour les liaisons intercontinentales) et à production plus décentralisée. La production pourrait s'effectuer, à la fois, de façon centralisée par des entreprises spécialisées comme actuellement mais également de façon très décentralisée chez les usagers par des moyens propres (solaire, éoliennes, hydraulique) qui leur appartiendraient éventuellement et leur offrirait une relative autonomie. En effet, l'énergie que nous dispensent généreusement la nature est répartie à la surface de la terre de façon plus ou moins égalitaire (les pays du "sud" sont d'ailleurs les mieux lotis...). Associé à des dispositifs de stockage essentiellement répartis, ce système de production réduirait les risques (pannes, conflits...) des systèmes fortement centralisés et assurerait une plus grande sécurité d'approvisionnement aux consommateurs. Un fonctionnement autonome, à puissance éventuellement réduite, serait ainsi possible. L'interconnexion offrirait l'avantage de la stabilité et de la coopération entre tous les producteurs et utilisateurs. Dans un tel réseau, l'électronique de puissance jouerait un rôle majeur pour permettre les échanges entre des moyens de production très variés.

5- Bibliographie

[Web_EIA] site internet de l'Energy Information Administration du gouvernement US, <http://www.eia.doe.gov/>

[Obs-En_FR98] Observatoire de l'Energie, "Tableaux des consommations d'énergie en France", Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, document 1998.

[Quid 98] Quid édition 1998, chapitre "énergie", pp.1751-1779.

[60M_97] Le guide de la maison économe, supplément de 60 millions de consommateurs 1997, conçu en collaboration avec l'ADEME.

[ECOD_98] Commission des Communautés Européennes et ADEME "Etude expérimentale des appareils électroménagers à haute efficacité énergétique placés en situation réel" Rapport du projet "Ecodrôme", janvier 98.

[CHAB_EU97] B. CHABOT, "Énergies renouvelables" Encyclopaedia Universalis 1997.

[AGUET_87] M. AGUET, J.J. MORF, "Énergie électrique", collection des traités d'électricité de l'EPFL, Presses polytech. romandes 1987.

[LATY_IEEE97] L. LATYSHEV, N. SEMASHKO, "Ecological Limitation to the Energy Transfer from the Outer Space to Earth", IEEE AES Systems Magazine, sept. 1997, pp.3-6.

[Web_IFP] site internet de l'Institut Français du Pétrole, <http://www.ifp.fr>.

[Web_CEA] serveur internet du Commissariat à l'énergie atomique, <http://papriska.saclay.cea.fr>.

[Web_LANL] serveur internet du Los Alamos National Laboratory, USA, http://tritium.lanl.gov/energy_research.html.

[PLS_nov95] Numéro spécial de Pour La Science, nov. 1995, pp.138-142.

[REE_mars96] "Les défis de l'énergie", REE n°3, mars 1996, pp.5-6.

[Web_géoth] site web sur la géothermie, <http://solstice.crest.o...thermal/gtc/supply.html>

[LVDR_août97] "En France, un camion sur trois transporte des déchets", La vie du rail, n°2609, 27 août 1997, p.47.

[EDF_sept97] H. CHEFDEVILLE, "Énergies renouvelables : lancement du programme éolien français ÉOLE 2005", Les cahiers de l'ingénierie, n°65, sept.97, pp.3-8.

[PLS214_95] E. Blondin, "Les stockages de gaz dans le sous-sol", Pour La Science n°214, août 1995, pp.48-54.

[MUL_95] B. MULTON, L. HIRSINGER, "Problème de la motorisation d'un véhicule électrique." (en deux parties) Revue 3E.I n°4, décembre 95 (partie I) pp.53-64 et n°5 mars 96, (partie II) pp.55-64.

[JUF_94] M. JUFER, A. CASSAT, N. MACABREY, "Swissmetro, a High Speed Underground Transportation System", SPEDAM, Taormina (Italy, June 1994, pp.227-230.

[REE_sept97] M. BANAL, "L'énergie marémotrice", REE n°8, sept.97, pp.6-7.

[REE_oct97] P. LAVY, "L'usine de la Rance : 30 ans d'exploitation", REE n°9, oct.97, pp.6-10.

[OBER_JEE97] C. OBERLIN, EDF DER, "La place de l'électricité dans le chauffage industriel des matériaux", Journée Electrothermie et Électrotechnique, CNIT 16 oct.97, pp.OBE1-OBE10.

[ADEME_EEA97] B. CHÉTIEN, ADEME, exposé (non publié) au congrès du club EEA sur la répartition de la consommation d'électricité dans les différents secteurs industriels, Congrès du Club EEA, Angers mai 1997.

[Web_Eole] Site web sur les énergies solaires écologie, Belgique, <http://www.arkham.be/ecotopie/eole.html>.

[RIC_REEavr97] A. RICAUD, "Les photopiles solaires, un bilan variable", REE n°4, avril 97, pp.8-9.

[RPA_89] B. BONDUELLE, B. IVOIRE, A. FERRIERE, "La centrale expérimentale Thémis : bilan et perspectives", Revue de Phys. Appl., avril 1989, pp.453-461.

[MUL_96] B. MULTON, J.M. PETER, "Stockage de l'énergie électrique. Moyens et applications.", Revue 3E.I n°6 juin 1996, pp.59-64.

Organismes français fortement impliqués dans le contrôle de l'énergie : ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), AIE (Agence Internationale de l'Energie), EDF, IFP (Institut Français du Pétrole), Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie).

Remerciements :

Pour les précieuses informations qu'ils m'ont aimablement communiquées, j'adresse mes remerciements à Benoît LEBOT, AIE (Agence Internationale de l'Energie), à Bernard CHABOT ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) Valbonne et à Bruno CHRÉTIEN, ADEME Angers.

Il subsiste probablement des erreurs dans ce document, je vous remercie pour votre indulgence et je vous saurai gré de me faire part de vos remarques.

Adresse de l'auteur :

*Antenne de Bretagne de l'ENS de Cachan,
Campus de Ker Lann - 35170 BRUZ,
email : multon@bretagne.ens-cachan.fr*