HAL
open science

L'énergie électrique : analyse des ressources et de la production

Bernard Multon

To cite this version:

Bernard Multon. L'énergie électrique : analyse des ressources et de la production. Journées de la section électrotechnique du club EEA 1999, Jan 1999, PARIS, France. 22p. hal-00674084

HAL Id: hal-00674084

https://hal.science/hal-00674084

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 ÉLECTRIQUE : ANALYSE DES RESSOURCES ET DE LA PRODUCTION

Bernard MULTON
Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan - LÉSIR
Campus de Ker Lann - 35170 BRUZ email : multon@bretagne.ens-cachan.fr

I- Introduction

L'énergie et l'information sont deux éléments fondamentaux de notre société moderne, toutes deux sont produites, transportées, transformées, stockées... De nombreuses analogies existent entre énergie et information à ceci près que nos « manipulations » énergétiques peuvent perturber gravement notre environnement car nos exigences en terme de transport et de confort font croître à un rythme démesuré nos besoins énergétiques. Depuis l'aube de l'humanité, nous brûlons des combustibles : d'abord le bois, puis les fossiles (charbon, pétrole, gaz), enfin l'uranium. En à peine plus d'un siècle, l'électricité, forme moderne de l'énergie par excellence, a pris une place de premier plan. Sa production absorbe le tiers de la consommation énergétique mondiale, principalement dans des machines thermo-mécaniques de rendement médiocre. La combustion à grande échelle des carburants fossiles conduit à des dégagements massifs de composés divers dont on commence à soupçonner qu'ils modifient les équilibres de la planète, par ailleurs, il est probable que nous aurons épuisé leurs réserves durant le siècle prochain. Les déchets nucléaires, malgré leur retraitement, s'amassent et, lorsque leurs producteurs sont peu scrupuleux, finissent dans des lieux non répertoriés. Certes, la fusion nucléaire donnait beaucoup d'espoir mais les problèmes technologiques qu'elle pose sont encore loin d'être résolus.

Parallèlement, la nature nous dispense, généreusement et de façon assez bien répartie sur la terre, une quantité d'énergie (renouvelable) très largement suffisante pour satisfaire à nos besoins. Il existe une multitude de solutions technologiques pour l'utiliser à grande ou petite échelle, que ce soit pour produire de la chaleur, de l'énergie mécanique ou de l'électricité qui, à son tour, peut être transformée.

Alors pourquoi l'exploitation des énergies renouvelables ne se développe-t-elle pas plus vite ? Les raisons sont à la fois politiques et économiques. En effet, les prix actuels des carburants fossiles sont très bas et gênent l'émergence de nouvelles technologies inévitablement plus coûteuses tant qu'elles n'ont pas atteint une production de masse. Parallèlement, une proportion croissante de la population s'inquiète, souvent à juste titre, des dangers liés à l'utilisation des combustibles fossiles et de la fission nucléaire. Cette fraction de la population, d'une part, et les nombreux lobbies industriels, d'autre part, exercent leurs influences au niveau politique pour faire pencher la balance de leur côté mais, pour l'instant, les seconds sont encore les plus puissants.

Dans cet article, nous faisons le point sur les ressources terrestres en énergie renouvelable (ER) et non renouvelable (ENR), puis nous examinerons l'évolution de la consommation humaine ainsi que les prévisions. Enfin, la production de l'électricité sera plus particulièrement analysée.

Parmi la multitude des unités d'énergie, nous avons choisi de tout convertir en kW.h car, pour un l'humain lambda, c'est l'unité la moins ésotérique. L'annexe, en fin d'article, donne quelques équivalences.

II- Les ressources énergétiques de la planète

Avant de commencer, il est bon de définir la terminologie utilisée. L'énergie primaire représente l'énergie directement transformable en chaleur, ainsi l'électricité issue des centrales thermiques via des cycles thermo-mécaniques (rendements de 30 à 50%) est qualifiée de secondaire. En revanche, l'hydroélectricité est appelée électricité primaire. Les énergies renouvelables (ER) sont, à notre échelle de temps, celles qui sont dispensées continûment par la nature, elles sont issues du rayonnement solaire, du noyau terrestre et des interactions gravitationnelles de la lune et du soleil avec les océans. Les énergies non renouvelables (ENR) sont issues des fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...) eux-mêmes issus de l'action du soleil pendant des dizaines de millions d'années, il s'agit d'une biomasse fossilisée. L'uranium utilisé pour la fission nucléaire ne peut également être considéré comme renouvelable car ses réserves sont limitées. Quant à l'énergie de la fusion, si nous la maîtrisons un jour, elle peut être qualifiée d'inépuisable à notre échelle. C'est peut-être l'un de ses dangers : une dissipation énergétique démesurée à la surface de la terre pourrait engendrer des bouleversements catastrophiques. Notons que l'homme consomme, aujourd'hui, une énergie correspondant à 1/8000ème de l'énergie solaire qui arrive à la surface de la terre.

Les énergies renouvelables [CHAB_EU97] et [Web_LANL]

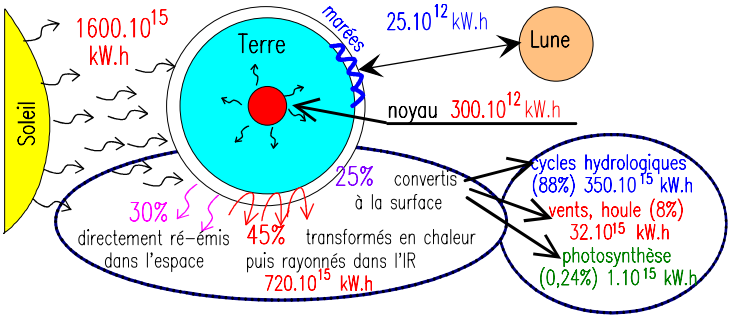


Figure 1 : *Sources et répartition quantitative annuelle des énergies renouvelables.*

Le rayonnement solaire

Rayonnement solaire au sol : l'énergie reçue à la surface de la terre (au total 720.10^{15} kW.h) varie, par m², de 1100 kW.h à 2300 kW.h/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 de 1 kW/m². Une grande partie frappe les océans et donne ce que l'on nomme communément l'énergie thermique mer soit environ 80.10^{12} kW.h (dans les zones tropicales : environ 20°C d'écart de température entre les eaux de surface et celles à 1000 m de profondeur).

L'ensemble des cycles hydrologiques convertit 360.10^{15} kW.h. 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 produites par le vent constituent également une source d'énergie exploitable.

L'énergie hydraulique techniquement exploitable vaut, selon les estimations, entre 15 et 25.10^{12} kW.h.

L'énergie éolienne, également exploitée depuis longtemps (propulsion à voile, moulins à vent, pompes à eau), représente une ressource énorme, 32.10^{15} kW.h,, dont la part terrestre exploitable est estimée à 50.10^{12} kW.h/an. Une grande partie se trouve « off-shore » , en effet les vents soufflent beaucoup plus fort au large et, surtout, plus régulièrement.

L'énergie de la houle disponible est évaluée à 8.10^{12} kW.h dont 90.10^{9} kW.h/an techniquement utilisables (une puissance d'environ 50 kW par m de front de vague semble récupérable).

Biomasse : il s'agit du produit de la photosynthèse. La part renouvelable annuellement (environ 20%) de la biomasse représente une énergie d'environ 800 à 900.10^{12} kW.h. Actuellement 3% sert de nourriture, 0,6% pour l'industrie du bois et du papier et 1,8% pour la combustion (chauffage et cuisine). On estime que la part aisément exploitable atteint 60.10^{12} kW.h.

La géothermie

Le noyau terrestre en fusion dégage une énergie annuelle d'environ 300.10^{12} kW.h (flux géothermique variant de 0,05 à 1 W/m², ce qui est très faible par rapport au rayonnement solaire). Les réserves exploitables sont d'environ 40.10^{9} kW.h en haute énergie (150 à 350°C, utilisée pour la production d'électricité) et 300.10^{9} kW.h en basse énergie (50 à 90°C pour le chauffage).

Les interactions gravitationnelles Terre-Lune-Soleil

Les marées sont le produit de ces interactions. L'énergie annuelle marémotrice représente environ 25.10^{12}kW.h. Une faible partie est utilisable dans les zones à forte marée présentant un étranglement, on l'estime à 270 à 500.10^{9} kW.h (l'usine de la Rance produit annuellement : $0{,}54.10^{9}$kW.h).

Ressources annuelles	Solaire	bio-masse	Cycles hydrologiques			Géo-therm.	Marées
estim. Glob. kW.h	700. 10^{15}	4,5. 10^{15}	360. 10^{15}			300. 10^{12}	25. 10^{12}
produits	---		hydro	éolien	houle	HTemp	estuaire
part exploitable	qq. 10. 10^{12}	60. 10^{12}	20. 10^{12}	50. 10^{12}	90. 10^{9}	40. 10^{9}	500. 10^{9}

Estimation des quantités d'énergie renouvelable et de leur part exploitable

Tableau 1

Les énergies non renouvelables [Web_IFP] et [Web_EIA]

Il s'agit des carburants fossiles : pétrole, charbon et gaz naturel, pour les plus connus, il y a aussi, en beaucoup plus grande quantité mais moins aisément exploitables, les schistes bitumeux. 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. Ces énergies présentent l'avantage d'un faible coût mais l'inconvénient d'être polluantes. Il est cependant possible de réduire les rejets (filtrage dans les cheminées, pots catalytiques...) mais le prix est accru.

Energies fossiles kW.h	Pétrole	charbon	gaz naturel	schistes bitumeux
réserves exploitables	1,8 à 2.10^{15}	8.10^{15}	$1{,}2.10^{15}$	2. 10^{15}
réserves totales estimées	4.10^{15}			
au rythme années 90	40 ans	220 ans	60 ans	? ?

Tableau 2

Le tableau 2 donne un ordre d'idée des réserves connues mais attention, les durées indiquées sont très hypothétiques et fondées sur les réserves connues exploitables ainsi que sur le rythme actuel de la consommation. La prospection pétrolière intensive révèle, en moyenne chaque année, l'équivalent de ce qui a été consommé... Malgré tout, nous disposons d'une durée très limitée d'exploitation des ENR qu'il est difficile d'évaluer objectivement. Il est ainsi très probable que nous aurons épuisé les énergies fossiles durant le XXIème siècle. Les réserves de charbon sont encore très importantes (surtout en Inde et en Chine) et leur exploitation va connaître probablement une forte croissance au cours du siècle prochain. Il sera alors nécessaire de sérieusement dépolluer sa combustion.

Nucléaire [Web_CEA] et [AGUET_87]

L'uranium 235 utilisé dans les réactions de fission nucléaire est un minerai épuisable. Les réserves sont estimées à 580.10^{12} kW.h. L'uranium 238, transformable en matière fissile dans les surgénérateurs est beaucoup plus abondant, il offrirait, si les surgénérateurs fonctionnaient à l'échelle industrielle, une réserve de 80.10^{15} kW.h, soit 10 fois les réserves connues de charbon. Inconvénient majeur de la fission, les déchets qui coûtent cher à retraiter et qui, après retraitement, conservent pour une part d'entre eux une radioactivité élevée à longue durée de vie. Leur stockage pose le problème de la pérennité et de la mémoire des sites.

La fusion devrait nous libérer du problème des déchets car elle est sensée être propre. Le deutérium et tritium sont en abondance suffisante : un litre d'eau de mer contient, en deutérium, de quoi fournir 1 MW.h. Le tritium doit être fabriqué, par exemple à partir du lithium dont les ressources terrestres offriraient 200.10^{15} kW.h et celles des océans 10^{21} kW.h (des millions d'années au rythme actuel). Mais tout cela est encore de la fiction.

III- La consommation humaine d'énergie

La consommation mondiale d'énergie primaire en 1998 vaut environ 130.10^{12} kW.h (11 Gtep), 82% est d'origine non renouvelable (figure 2). La biomasse représente 12% de l'énergie primaire, dont presque 90% dans les pays en voie de développement.

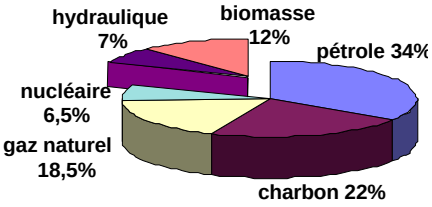


Figure 2 : *Répartition par source des130.10^{12} kW.h de la consommation mondiale d'énergie primaire en 1998*

Le tableau 3 montre les quantités d'énergie consommées par habitant et par jour. Notons que les pays les plus au nord ont des besoins énergétiques de chauffage importants, ainsi le Canada à une demande de 310 kW.h par jour et par habitant.

pays/consom. par hab. par j.	USA	France	Monde
% de la consom. mondiale	24%	2,8%	100%
kW.h primaires par hab. par jour	253	120	72
kW.h électriques par hab. par j.	28	19	2,3
kW.h électriques domestiques	10	6,2	?

Tableau 32

La figure ci-dessous donne la répartition de la consommation mondiale par secteurs d'activité. Cette répartition cache de fortes disparités entre pays industrialisés et en voie de développement. Les transports exploitent à 96% le pétrole, l'industrie utilise à part égale pétrole, charbon, gaz naturel, électricité et énergies renouvelables [MUL_3EI98].

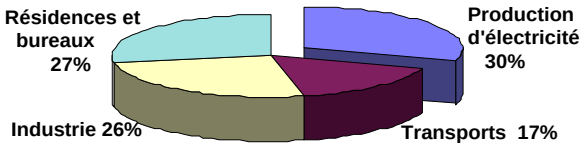


Figure 3 : *Répartition par mode de la consommation mondiale d'énergie primaire*

<u>Répartition de la consommation d'énergie en France</u> [Obs-En_FR98] et [Web_IFP]

La France consomme actuellement $2,7.10^{12}$ kW.h dont 500.10^{9} kW.h pour les transports terrestres dont environ la moitié pour des trajets urbains. Le chauffage des locaux et de l'eau représente environ 230.10^{9} kW.h dont 70% pour le secteur résidentiel.

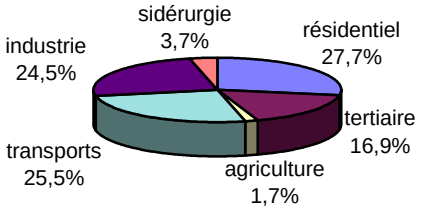


Figure 4 : *Consommation d'énergie primaire en France*

Les transports utilisent l'électricité à raison de seulement 5%, principalement pour les trains. L'optimisation énergétique des transports passera très probablement, dans le siècle prochain, par l'électricité [EVS15_Petrie]. Mais il s'agira sûrement d'une électricité produite à bord des véhicules par des générateurs utilisant un combustible. La figure 5 montre la répartition de consommation des différents modes de transport.

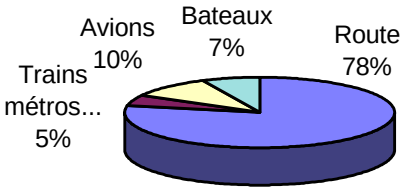


Figure 5 : *Répartition par mode de la consommation du secteur des transports en France*

Notons qu'une voiture automobile nécessite environ 20 kW.h pour 100 km, ce qui conduit à environ 100 kW.h primaires avec les groupes moto-propulseurs actuels, une voiture tout-électrique optimisée consomme environ 10 kW.h et un vélo moins de 1 kW.h.

<u>Prévisions</u>

L'art de la prévision est difficile ! Les paramètres sont nombreux et il faut faire des hypothèses souvent hardies. Par exemple, pour une fécondité de 1,7 ou 2,1 enfants par femme, la population humaine vaudra, en 2150, de 4 ou 40 milliards d'habitants, la situation économique, en particulier dans les pays en voie de développement, jouera également un rôle majeur. Enfin, la prise de conscience environnementale, plus particulièrement dans les pays industrialisés, pourra ralentir la croissance énergétique.

Un raisonnement à l'échelle planétaire est indispensable, en ce qui concerne les risques écologiques. Imaginons seulement que les 10 milliards d'habitants, qui vivront probablement sur terre au milieu du siècle prochain, consomment 200 kW.h/jour, cela représenterait un accroissement de consommation d'un facteur 6 par rapport au présent. La figure 6 montre les évolutions passée et future de la consommation d'énergie primaire mondiale.

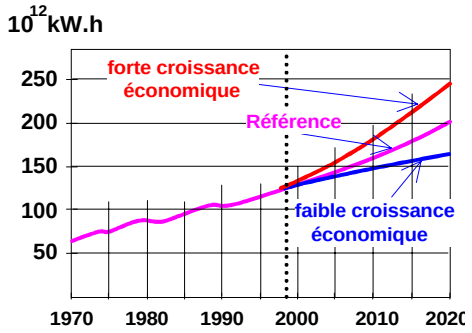


Figure 6 : *Hypothèses de croissance de la consommation d'énergie primaire [Web_EIA]*

La part des ER augmentera probablement mais prévoir quelle sera la part des différentes sources d'énergie est certainement l'art le plus délicat. La figure 7 montre une telle prévision jusqu'en 2060.

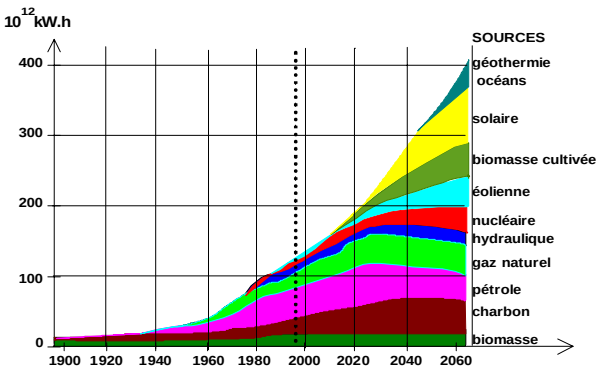


Figure 7 : *Prévision d'évolution de la production [Web_Shell]*

Conversion d'énergie

Les principales formes d'énergie requises sont la chaleur (habitat, cuisine, industrie), le travail mécanique et l'électricité. Cette dernière permet d'ailleurs de donner les deux premières avec un excellent rendement et de grandes possibilités de formes. Sans être exhaustif, on peut donner une vision schématique des possibilités de conversion d'énergie à partir des sources naturelles, la figure 8 montre un schéma décrivant les possibilités de conversion à partir de l'énergie solaire.

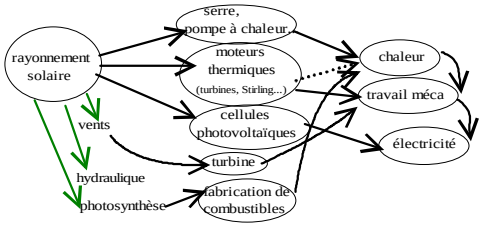


Figure 8

IV- L'énergie électrique : production et consommation

L'électricité nous est tellement familière que beaucoup de personnes oublient qu'elle est devenue indispensable. Sa production à grande échelle date d'un peu plus de 100 ans. Au niveau mondial, nous sommes passés d'une production de 120 TW.h en 1920 à environ 15 000 TW.h en 1998. En France, on a produit 3 TW.h en 1920 (2,5% de la production mondiale) et 490 TW.h en 1998 (3,8%) avec une puissance totale installée d'environ 120 GW.

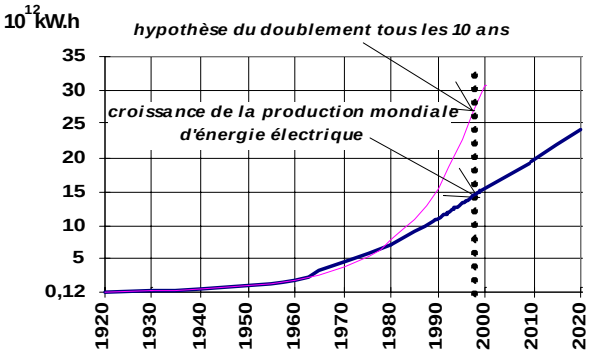


Figure 9 : *Evolution de la production d'énergie électrique*

Jusqu'en 1974 (premier choc pétrolier), la consommation suivait la fameuse loi du doublement tous les 10 ans. Après, la prise de conscience du gaspillage énergétique dans lequel on s'était engagé et, surtout, la recherche d'une dépense énergétique moindre a infléchi la courbe de consommation. Les pays les plus avancés consomment moins d'énergie dans les différents process industriels. La figure 9 montre la courbe de croissance avec prévision jusqu'en 2020 [Weedy_98] et [Web_EIA] et la courbe hypothétique avec doublement tous les 10 ans.

Production conventionnelle d'électricité

La production centralisée d'électricité s'effectue, le plus souvent, à partir de cycles thermiques avec un mauvais rendement (environ 30%, les centrales actuelles au gaz et à cycles combinés permettent des rendements proches de 50%), la chaleur dégagée est quelquefois récupérée (cogénération, en développement rapide), la plupart du temps, elle est évacuée et réchauffe les eaux des rivières et l'air de l'atmosphère. La consommation d'énergie primaire pour la production de l'énergie électrique atteint, dans le monde : 40.10^{12} kW.h et en France : $1,4.10^{12}$ kW.h. Les principales sources d'énergie sont les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz), la fission nucléaire et la force hydraulique, la figure 10 donne leurs participations respectives dans le monde et en France.

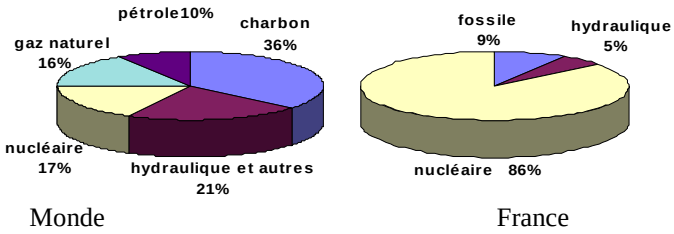


Figure 10 *: Parts de la production d'électricité selon les sources d'énergie primaire*

L'hydroélectricité est produite avec un excellent rendement (peu de pertes dans les conduites et alternateurs à très haut rendement). L'eau est également souvent utilisée pour stocker l'énergie à bas coût grâce aux centrales de pompage qui puisent dans l'énergie nucléaire aux heures de basse consommation puis la restituent aux heures de pointe.

La puissance électrique installée au niveau mondial était 3000 GW en 1996 (en 1980, cette puissance était de 2380 GW). La figure 11 montre la répartition par sources de la puissance installée et de l'énergie produite en 1996 [Web_EIA] :

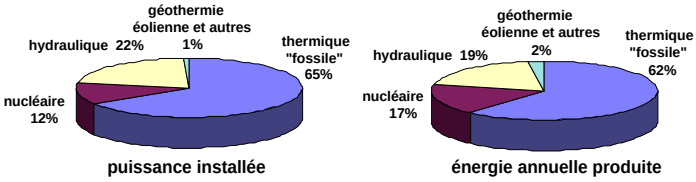


Figure 11 :
Répartition de la production électrique en 1996, en puissance installée (3000 GW) et en énergie produite (12800 TW.h)

En ramenant les 12 800 TW.h produits aux 3000 GW installés, tout se passe comme si le système de production fonctionnait en moyenne 4300 heures par an soit environ la moitié du temps (respectivement :

4000h, 6280h, 3800h et 7640h par an pour le thermique classique, le nucléaire, l'hydraulique et les autres).

La figure 12 met en évidence l'évolution prévue [Web_EIA] des parts respectives des différentes énergie primaire pour la génération d'électricité de 1995 (40.10^{12} kW.h) à 2020 (70.10^{12} kW.h).

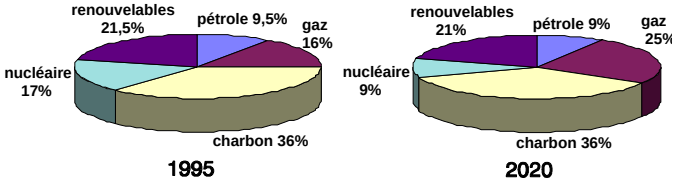


Figure 12 : *Evolution prévue des parts des sources d'énergie*

Consommation d'électricité en France [Web_EDF]

En France, la consommation totale de 1997 a été d'environ 410 TW.h (pour une production de plus de 480 TW.h) dont 122 TW.h (31%) pour l'industrie, 122 TW.h pour le secteur résidentiel également et 92 TW.h (23%) pour le secteur tertiaire. La figure 13 montre comment se répartit la consommation industrielle d'électricité [ADEME_EEA97, OBER_JEE97].

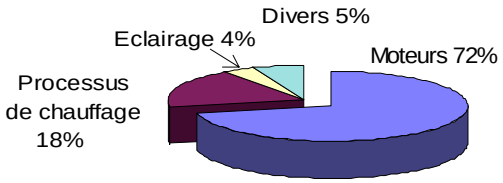


Figure 13 : *Répartition de la consommation industrielle d'électricité.*

La figure 14 montre la répartition de la consommation d'électricité dans les secteurs tertiaire (92 TW.h) et résidentiel (122 TW.h) [Obs-En_FR98]. La rubrique divers du secteur tertiaire représente, notamment, l'éclairage et les ordinateurs.

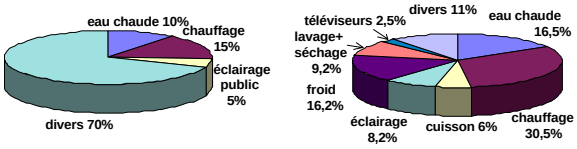


Figure 14 : *Répartition de la consommation des secteurs tertiaire et résidentiel*

Production d'électricité par les énergies renouvelables

Hydraulique

C'est aujourd'hui, et de très loin, la première source renouvelable d'électricité. La puissance installée dans le monde atteint 730 GW (150 GW en Europe de l'Ouest avec 580 TW.h), pour une production annuelle de 2700 TW.h. C'est une solution extrêmement attractive qui est exploitée presqu'au maximum des possibilités dans les pays industrialisés. En France, plus de 90% des possibilités sont utilisées. Dans le monde, on estime à 25.10^{12} kW.h la part exploitable. 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, la Chine construit une centrale de 18 GW (barrages des Trois Gorges), soit 27 générateurs de 700 MW, qui devrait être opérationnelle en 2002. Plus d'un million de personnes devront être déplacées, plusieurs sites archéologiques majeurs vont être inondés et les conséquences sur l'environnement seront fortes.

Figure 15 : *Centrale au fil de l'eau de Carillon d'Hydroquébec 654 MW*

En France, plus de 500 ouvrages sont exploités par EDF pour une puissance totale installée de 23 GW, 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 dénivelée, d'une contenance de 170 Mm^3 permettent le stockage de 400.10^6 kW.h, 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. Les micro-centrales hydrauliques se révèlent également intéressantes pour une production décentralisée (85 TW.h au monde).

Solaire thermique [Web_Seia]

On peut aussi utiliser directement 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, ont conduit à un rendement net de l'ordre de 15%. Le coût du kW.h produit ne s'est pas révélé compétitif et l'expérience n'a pas donné suite.

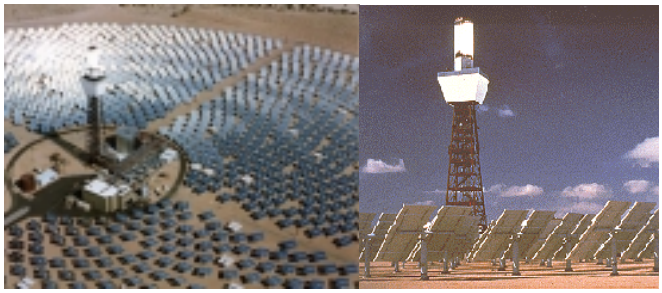


Figure 16 : *Centrale thermique solaire Solar Two en Californie 10 MW (mise en service 1996)*

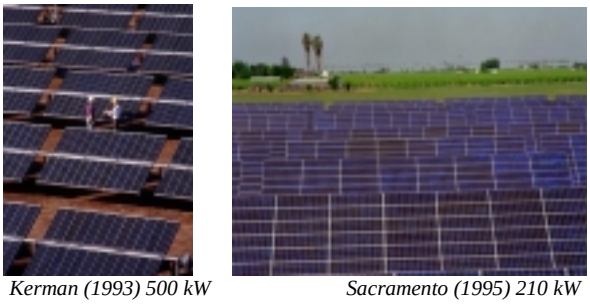
Cependant, il y a eu d'autres expériences plus concluantes à l'étranger notamment aux USA, la figure 16 montre l'usine Solar Two de 10 MW électriques en Californie. On prévoit plus de 700 MW installés à partir de 2003.

Solaire photovoltaïque :

Les cellules au silicium ont un rendement d'environ 12% et sont encore chères. Malgré le fait que le coût du watt crête installé (à grande échelle) baisse en permanence (environ 40 F en 92, 20 F en 96 et 10 F en 2000), il faut un ensoleillement important pour arriver à un coût compétitif du kW.h. Pour ces raisons, la production photovoltaïque est normalement réservée aux sites isolés (dispositifs divers et habitat). Des dispositifs à concentration du rayonnement permettent d'envisager des rendements futurs d'environ 40% [BON_REE98].

Pour l'instant, la production photovoltaïque est plutôt réservée à l'alimentation en site isolé d'équipements et d'habitations (200 000 maisons). Il y a encore très peu d'installations à grande échelle. En Italie, une usine de 3,3 MW produit 4,6 GW.h annuels sur le site de Serre (32 000 m² de modules, puissance crête 105 W/m²). La plus grande usine est en construction en Crête, 5 MW sont déjà installés et un total de 50 MW devraient être en service en 2003.

On estime la puissance photovoltaïque installée dans le monde à environ 700 MW, en large majorité en production localisée, pour une énergie produite très approximativement égale à 0,7 TW.h.



Kerman (1993) 500 kW *Sacramento (1995) 210 kW*

Figure 17 : *Usines californiennes de production photovoltaïque*

La surface totale des toitures d'habitations en Europe est évaluée à 3600 km². En imaginant qu'un jour le coût de l'énergie photovoltaïque deviennent compétitif, avec 100 W/m², la puissance totale pourrait atteindre 360 GW et l'énergie annuelle produite 360 TW.h (avec une production de 100 kW.h/m², soit un équivalent de 1000 h de plein ensoleillement).

Enfin, une autre alternative, qui tient encore de la fiction, est celle de la production photovoltaïque dans l'espace avec transmission au sol par faisceaux micro-ondes. La Nasa, en particulier, a imaginé des usines photovoltaïques de plus de 10 km² qui pourraient un jour nous approvisionner en continu (pas de nuages ni d'alternance jour-nuit) [Astra_98] .

Aéro-génération (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. La production à grande échelle (turbines de quelques 100 kW) devient également rentable dans les zones suffisamment ventées, en particulier « offshore ». Actuellement, 9,5 GW éoliens sont installés dans le monde pour environ 19 TW.h produits annuellement alors qu'il n'y en avait que 15 MW en 1981 et les aérogénérateurs produisent 0,11% de l'électricité mondiale. Le coût de revient actuel est de 30 à 40 centimes/kW.h. 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. Aux USA, principalement en Californie, 1700 MW sont en service. 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).

Le potentiel français terrestre est de 66 TW.h (avec 20 GW) ce qui n'est pas négligeable (même ordre de grandeur que l'hydraulique), actuellement une puissance d'environ 10 MW est installée. Le potentiel offshore (à moins de 10 km des côtes) est estimé à 100 GW.h/an. 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).

Il a été évoqué sérieusement, à la dernière conférence sur le climat (Buenos Aires), une possibilité de production éolienne à hauteur de 10% de l'électricité mondiale en 2017 (2000 TW.h), ce qui signifie 800 GW installés.

Figure 18 : *Ferme éolienne offshore (11 X 450 kW) (mer Baltique côtes du Danemark)*

Générateurs utilisant la houle [Web_wave]

La houle représente un immense gisement d'énergie, cependant le milieu marin est relativement hostile (tempêtes, corrosion). Des recherches sur des générateurs électromécaniques utilisant le mouvement ondulatoire de l'eau ont été menées mais il n'y a pas, à notre connaissance de production à grande échelle.

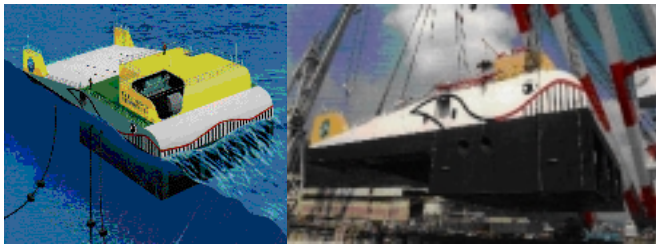


Figure 19 : *Système de production d'énergie par la houle Jamstec*

Plusieurs types de dispositifs ont été testés, souvent à échelle réduite. Les systèmes sont localisés soit en surface, soit sous la surface à des profondeurs comprises entre 30 et 60 m en offshore et 10 à 30 m sur le littoral. Ces générateurs peuvent être intéressant pour l'alimentation de balises en mer ou pour les plates-formes pétrolières offshore. Plusieurs sociétés ont réalisé des dispositifs de conversion électromécanique, on peut citer le Japan Marine Science and Technology Center (Jamstec) [Web_jamstec] qui a mis en service en 1998, un prototype flottant de 50 m sur 30 m et 12 m de profondeur pour une puissance de 110 kW (environ 4 kW par mètre de front de vague, 3 génératrices asynchrones 1 X 50 kW et 2 X 30 kW), il pourrait produire, annuellement, environ 120 MW.h.

Cogénération à partir de la biomasse ou de déchets

Plutôt que d'utiliser des combustibles fossiles ou des réactions nucléaires, on peut également brûler des produits de la photosynthèse directs (bois, bagasse...) ou en extraire un combustible de meilleure qualité (biogaz : méthane, méthanol) dans des usines spécialisées. Aux USA, plus de 350 usines totalisent une production de plus de 7000 MW électriques ; sans compter les nombreuses entreprises qui effectuent une cogénération à partir de la biomasse. A grande échelle, on peut utiliser des turbines à vapeur et, à petite échelle, des moteurs à combustion interne.

Une idée renaît actuellement pour des dispositifs résidentiels à cogénération (production de chaleur et d'électricité) à partir de la combustion de déchets végétaux ou ménagers. La société Sunpower (système Biowatt) envisage une commercialisation de co-générateurs en 2000 pour des puissances électriques de 500 W à 10 kW (15% de l'énergie est transformée en électricité et 70% en chauffage). Les ordures ménagères représentent également une source d'énergie intéressante. Dans les pays industrialisés, l'incinération d'une tonne d'ordures ménagères permet de produire 300 à 500 kW.h. En région parisienne, la filiale d'EDF, Tiru, produit annuellement environ 250 MW.h d'électricité et 4,5 Mt de vapeur pour le chauffage urbain en incinérant des ordures ménagères. A Strasbourg, la société Protires incinère 245 000 tonnes de déchets pour produire électricité (turbo-alternateur de 22 MW), vapeur et mâchefers (72 000 tonnes).

Production électro géothermique

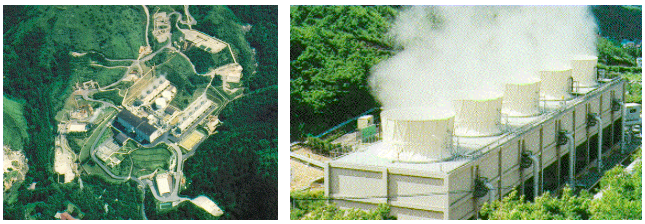


Figure 20 : *Centrale géothermo-électrique de Hatchobaru (Japon) 300 MW*

La géothermie haute énergie (150 à 350°C) permet de produire de l'électricité en transformant de l'eau en vapeur ou en utilisant directement la vapeur sous pression. La puissance installée au monde était, en 1998, de 8 GW électriques (2,85 aux USA, 1,78 aux Philippines : 19% de la production d'électricité) [Web_géoth] pour une production totale d'environ 50 TW.h. En France (à Bouillante en Guadeloupe, mise en service en 1985), la capacité de 4,2 MW reste marginale ; en Europe, l'Italie dispose d'une capacité de production de 740 MW pour une énergie annuelle de 4 TW.h avec une centrale de grande puissance (Valle Secolo, 1991) : 2 groupes de 60 MW.

Aux Philippines, un quart de l'énergie électrique est produite par géothermie et environ un autre quart par des centrales hydroélectriques. Le Japon a une capacité de production de 530 MW, la figure 20 montre les tours de refroidissement de l'usine de Hatchobaru II d'une puissance de près de 300 MW.

Production marée-motrice

L'usine marémotrice de la Rance [BAN_REEsept97] (24 groupes de 10 MW) produit annuellement 540.10^6kW.h soit environ 91% de l'énergie électrique marémotrice mondiale, elle reste actuellement l'une des deux usines marémotrices au monde de taille industrielle (l'autre est au Canada à Annapolis : 20 MW). En 30 ans, elle a produit 16TW.h. Le prix du kW.h, toutes charges comprises, s'établit à environ 0,18 F ce qui est très rentable. Des projets sont à l'étude, on peut en citer deux importants : celui de la Fundy Bay au Canada où une usine de 5300 MW est envisagée et celui du barrage de Severn en Angleterre avec 216 turbines d'une puissance totale de 8640 MW, cet ouvrage pourrait fournir 7% de la consommation de l'Angleterre et du Pays de Galles.

Figure 21 : *Usine marémotrice de la Rance 240 MW*

V- Bilan

Nous disposons d'énergie en abondance pour satisfaire nos besoins, mais pour l'instant une faible proportion des hommes y a accès. En outre, la combustion massive des énergies fossiles menace notre environnement. Pour préparer un avenir plus serein, il faut penser dès maintenant à une évolution vers une plus grande utilisation des énergies renouvelables (ER). Elles permettent de produire, avant tout, de la chaleur à bon marché mais de l'énergie mécanique ou de l'électricité sont également accessibles avec des technologies bien éprouvées ou en développement.

L'électricité particulièrement appréciée par la civilisation moderne et, dont les vertus ne sont plus à démontrer, va occuper une place toujours plus grande. Sa génération doit donc évoluer vers plus de propreté. Il n'est pas possible de bouleverser brutalement un système bien établi et le passage aux ER, qui semble une nécessité pour que l'ensemble de la population mondiale atteigne notre niveau de vie, doit se faire progressivement. Une production centralisée pourra être avantageusement associée à une production décentralisée au niveau des utilisateurs, les ER étant elles-mêmes réparties. Ce système garantira une plus grande sécurité d'approvisionnement en cas de conflit ou de

panne. Dans ces conditions, un stockage d'énergie, meilleur marché et à plus longue durée de vie que les actuels accumulateurs électrochimiques, se révèle indispensable [LAU_SEE96] et [MUL_96].

Sur la figure 22, nous proposons un système mixte de production d'électricité centralisée (actuel) associé à une production répartie (ou décentralisée).

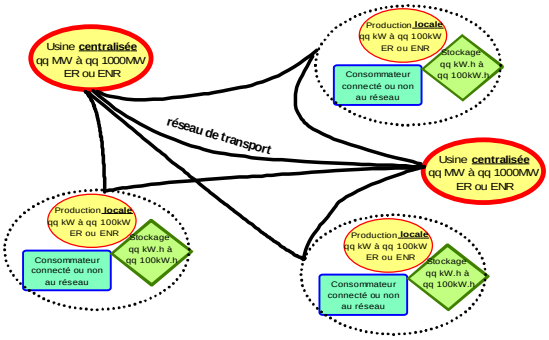


Figure 22 : *Système de productions centralisée et décentralisée en réseau.*

La nouvelle réglementation européenne en matière de production et de distribution de l'énergie électrique, qui entre en vigueur cette année présente, paradoxalement, un risque pour le développement des ER. En effet, leur coût de production est encore élevé et leur rentabilité n'est pas toujours certaine, une concurrence accrue pourrait faire baisser le prix de l'électricité et nuire à leur émergence. La baisse du prix des combustibles fossiles conduit au même risque. C'est pourquoi, une véritable incitation au niveau politique est nécessaire. C'est ce que fait le Danemark qui applique une des politiques les plus volontaristes en matière de développement des ER et de lutte contre le gaspillage.

Dans cet article, nous n'avons abordé que la production stationnaire d'énergie, il faut cependant noter que les systèmes de transport utilisent de plus en plus d'électricité, pour les équipements embarqués ainsi que pour la propulsion. La production embarquée à partir de combustibles est quasiment inévitable pour disposer d'électricité à bord, car c'est la meilleure solution en énergie massique et de très loin. Dans les bateaux, les trains autonomes, les générateurs sont des alternateurs entraînés par des moteurs thermiques (diesel ou turbines), les automobiles feront probablement appel aussi, au cours du siècle prochain à une production thermo-électrique pour leur propulsion (exemple de l'automobile hybride Toyota Prius sortie en 1998).

On ne pourrait clore le sujet sans évoquer, d'une part, l'hydrogène, carburant propre par excellence, à condition qu'il soit produit proprement et d'autre part, la pile à combustible qui permet une conversion directe thermique-électrique. Leur association semble offrir la source idéale d'énergie électrique embarquée.

En matière d'énergie, il va falloir apprendre, d'une part, « *mieux produire et moins consommer* », d'autre part, à diversifier nos solutions de production afin de minimiser les conséquences inévitables de l'activité humaine sur son environnement.

Comparée à l'âge de la terre et à celui de l'humanité, la durée d'exploitation des combustibles fossiles donne la sensation « d'une allumette dans les ténèbres de l'éternité » [CRE_96]. Cette allumette doit nous permettre de préparer notre avenir énergétique, agissons vite avant qu'elle ne s'éteigne ! (l'auteur de cette métaphore, Peter CREOLA, est president du Long Term Space Policy Committee à l'ESA, European Space Agency).

VI- Bibliographie

[MUL-3EI98] B. MULTON, « L'énergie sur la terre : analyse des ressources et de la consommation. La place de l'énergie électrique. », Revue 3E.I n°13, septembre 98, pp.29-38.

[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.

[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, PPF 1987.

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

[Web_EDF] site internet d'électricité de France, http://www.edf.fr/

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

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

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

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

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

[Web_Seia] site web de Solar Energy Industries Association, http://www.seia.org.

[Astra_98] AD Astra magazine NASA, Space Solar Power Systems, jan/feb 1998.

[Weedy_98] B.M. WEEDY, B.J. CORY, « *Electric Power System* », J. Wiley & Sons. Ed. 1998.

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

[BAN_REEsept97] M. BANAL, « *L'énergie marémotrice* », REE n°8, sept.97, pp.6-7.

[Web_wave] site web danois sur l'énergie des vagues http://www.waveenergy.dk/english.htm

[Web_jamstec] site web de la société jamstec (énergie des vagues) http://www.jamstec.go.jp/jamstec/MTD/Whale/

[OBER_JEE97] C. OBERLIN, EDF DER, « La place de l'électricité dans le chauffage industriel des matériaux », Journée Électrothermie 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 écotopie, Belgique, http ://www.arkham.be/ecotopie/eole.html.

[Web_Shell] Site web de la société Shell sur les énergies renouvelables, http ://www.deutsche-shell.de/uebers/renew/solar.htm.

[EVS15_Petrie] D. PETRIE, « Urban Mobility in the 21st Century », EVS15 Conf. Brussels, oct 98.

[BON_REE98] H. BONGRAIN, L. DESCHAMPS, H. LAUVRAY « Nouveau concept de générateur solaire à haut rendement et à transposition de spectres », REE n°5, mai 1998, pp.6-11.

[LAU_SEE96] S LAURENT (EDF-DER) : « Intérêt économique des batteries dans les postes sources », Journée SEE Stockage de l'énergie, 1er février 96, Paris.

[MUL_96] B. MULTON, J.M. PETER, « *Stockage de l'énergie électrique. Moyens et applications.* », Revue 3E.Ijuin 96, pp.59-64.

[CRE_96] P. CREOLA, « *Space and the Fate of Humanity* », Symp. Space of service to Humanity, 5-7 feb. 96, Strasbourg., pp.3-14.

VII- Annexe : équivalences

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