

Un Autre Paysage Énergétique Possible

Analyse des bilans énergétiques nationaux, de la place de l'utilisation rationnelle de l'exergie et de la part des énergies renouvelables.

Christian Couturier. Juin 2002.

e-mail : christian.couturier@solagro.asso.fr

SOMMAIRE

1. RÉSUMÉ	2
2. PRÉAMBULE	4
2.1 Recommandations de lecture	4
2.2 Avant-propos	5
3. PRODUCTION ET CONSOMMATION D'ÉLECTRICITÉ : UNE LECTURE DES BILANS OFFICIELS	6
3.1 Production primaire, consommation primaire, consommation finale	6
3.2 La consommation finale : répartition par « secteurs » et ventilation par « source »	8
3.3 Les usages de l'électricité : des « secteurs » aux « usages »	9
4. DE L'USAGE RATIONNEL DE L'ÉNERGIE	13
4.1 Energie utile / énergie dépensée : un rendement global de 51 %	14
4.2 Maximiser le rendement exergétique	17
a) Les transports.	18
b) La cogénération.	18
c) Micro, mini, méga réseaux de chaleur : un vrai service public de l'énergie	19
d) De la logique d'effets d'échelle à celle d'effet de série	20
5. ME + URE + ER = EQUATION GAGNANTE	21
5.1 Réduire les besoins	21
5.2 L'usage rationnel de l'énergie	22
5.3 Les énergies renouvelables	22
a) Le solaire indirect	22
b) Le solaire direct	23
5.4 Un scénario de sortie du nucléaire	24
5.5 APEP - un scénario soutenable	26
a) Première esquisse d'un scénario soutenable	26
b) Un scénario à haute performance énergétique	28
c) Un scénario qui repose sur des technologies déjà opérationnelles	29

6. ET ENSUITE ?	29
a) Un guide récapitulatif	29
b) Les questions qui restent à préciser	31
c) Des indicateurs à mettre en place	31
d) En conclusion	31
7. ANNEXES	32
7.1 Bibliographie	32
7.2 Electricité	33
7.3 La maîtrise de la demande d'électricité	35
7.4 Comptabilité énergétique et représentations	36
La représentation selon la comptabilité officielle	36
Energie « livrée »	36
c) Energie « utile »	36
d) La nouvelle comptabilité adoptée en 2002	37
7.5 Thermodynamique : rappel de cours	39
a) Les principes de la thermodynamique	39
b) L'exergie et les formes d'énergie	39
7.6 Cogénération : problèmes et opportunités	41
a) Quelques précisions sur le ratio « travail / chaleur »	41
b) Saisonnalité	42
c) Stockage	43
7.7 Le véhicule électrique	44
7.8 La pompe à chaleur et le chauffage « géosolaire »	45
7.9 Et au niveau mondial ?	48
7.10 Les énergies renouvelables dans le scénario « APEP »	50
7.11 Le solaire, combien de millions de mètres carrés ?	51
7.12 APEP en pratique	53
7.13 Dans quelle mesure le nucléaire a-t-il permis à la France de réduire ses émissions de gaz à effet de serre ?	54

1. Résumé

Cette analyse présente les bilans énergétiques nationaux à partir de la comptabilité énergétique nationale, sous une forme qui fait apparaître certains éléments qui ne sont pas explicités dans les bilans officiels, et sont pourtant essentiels à toute réflexion prospective sur l'énergie : regroupement des énergies par type de source (fossiles c'est-à-dire charbon, pétrole et gaz ; nucléaire ; et renouvelables y compris l'hydraulique) ; répartition entre les deux grandes formes de l'énergie (chaleur et travail) ; besoins en énergie « utile » ; ventilation de la consommation finale d'électricité par source...

Nombreux sont ceux qui surévaluent très largement la place de l'uranium. Première confusion : beaucoup sont persuadés que l'uranium représente près de 80 % de la consommation d'énergie, alors que ce chiffre ne représente que sa part dans la production primaire d'électricité. Seconde confusion : le mode de comptabilité adopté (la tonne-équivalent pétrole) revient à comptabiliser la chaleur perdue des centrales nucléaires, et une lecture non avertie des bilans énergétiques conduit à surestimer d'un facteur trois le rôle du nucléaire. D'ailleurs, la nouvelle comptabilité adoptée en 2002 divise la part de l'électricité, dans la consommation finale d'énergie, par presque 3 par rapport au mode de comptabilité précédent !

En réalité, l'uranium ne contribue qu'à hauteur de 71 % de la consommation finale d'électricité, 15 % de la consommation finale d'énergie totale, et 20 % à la couverture des besoins utiles. Ceux-ci sont assurés par ailleurs à 12 % par les renouvelables et 68 % par les énergies fossiles. Notre système énergétique continue donc à être largement dominé par les fossiles, et pas seulement dans le domaine des transports.

Le « rendement global » du système énergétique « France » est à peine égal à 50 % : près de la moitié de l'énergie consommée en France est en effet « perdue ». Il s'agit essentiellement des applications qui consistent à fournir du travail sans utiliser la chaleur : centrales nucléaires et moteurs de véhicules. En effet, il s'agit dans ces deux cas de machines qui obéissent aux lois de la thermodynamique, et qui pour fournir 1 unité d'énergie sous forme de travail en consomment 3 sous forme de combustible (dite énergie primaire) et en produisent 2 sous forme de chaleur – perdue si elle n'est pas récupérable, ce qui est effectivement le cas des centrales de grande capacité et des véhicules.

L'énergie « utile » - qui tient compte des pertes et rendements des appareils, moteurs ou chaudières, depuis la source primaire jusqu'à l'utilisation finale - est utilisée à un tiers sous forme de travail (au sens large : électricité dite « spécifique », propulsion des véhicules) et deux tiers sous forme de chaleur. Ce ratio de 1 pour 2 est particulièrement intéressant puisqu'il correspond justement aux ratios précédents, c'est-à-dire au rendement de machines thermodynamiques classiques.

En effet, si toute l'énergie employée en France était utilisée par des machines thermodynamiques fournissant du travail et valorisant la chaleur produite, le « rendement global » approcherait les 100 %, ce qui signifie qu'il serait en théorie possible d'assurer la totalité des besoins utiles en divisant par deux la consommation d'énergie primaire. Même si en pratique, il n'est pas envisageable d'atteindre ce rendement parfait, cette analyse montre que l'amélioration du rendement global actuel offre une grande marge de manœuvre.

Cette analyse, qui repose sur un raisonnement en terme d'« exergie » (c'est-à-dire une analyse de la valeur de l'énergie), impose la cogénération, les réseaux de chaleur, les véhicules performants... Elle privilégie la production décentralisée (sans nécessairement descendre au niveau individuel), l'effet de série plutôt que l'effet d'échelle, le service public des énergies (et notamment de la chaleur) plutôt que le seul service public de l'électricité.

On peut à partir de ces éléments, élaborer un scénario de sortie du nucléaire en 4 points :

1) la **suppression des usages thermiques de l'électricité** (chauffage surtout, mais aussi eau chaude), soit 20 % de la consommation finale d'électricité. Il s'agit d'une mesure « sans regret » qui ne génère ni hausse de consommation d'énergie fossile ni hausse des émissions de gaz à effet de serre. En effet, un tiers de l'électricité utilisée pour ces applications est produite par des centrales à combustibles fossiles, capables de fournir l'appoint lors des pointes hivernales. Le rendement de ces centrales étant d'un tiers, ceci signifie que l'on consomme autant de combustible fossile avec le chauffage électrique qu'avec un chauffage central classique au fioul ou au gaz.

2) la **maîtrise de la demande d'électricité et l'éolien** : il existe un important gisement d'économies d'électricité sans surcoût ou dont l'investissement est rapidement remboursable (électroménager, éclairage, moteurs électriques...). Quant à l'énergie éolienne, le parallèle « éolien ou nucléaire » souvent entendu pose mal le débat. Il ne s'agit évidemment pas de substituer l'éolien au nucléaire, néanmoins l'éolien est capable de prendre une place significative. MDE et éolien peuvent représenter à relativement court terme près de 25 % de la consommation d'électricité.

3) Ces trois mesures, qui s'imposent quelle que soit l'option choisie pour l'avenir, représenteraient alors les deux tiers de la contribution du nucléaire dans le bilan énergétique. Reste à assurer un solde de production d'électricité : si celui-ci est couvert par **cogénération**, il serait nécessaire de consommer 7 % de combustibles fossiles supplémentaires par rapport à la consommation actuelle.

4) **L'alternative est alors la suivante** : maintenir un parc nucléaire avec toutes ses implications en termes de risques, de coût et de gestion des déchets, pour éviter ces 7 % ; ou bien consacrer les efforts à valoriser les gisements que représentent les énergies **renouvelables** (biomasse et solaire) et la maîtrise de l'énergie pour le **chauffage** et dans les **transports**. Gisements bien supérieurs à ces 7 %, sans doute moins coûteux et créateurs de plus d'emplois, avec des effets secondaires positifs (en particulier dans les transports).

Il est donc possible de sortir du nucléaire par une politique reposant sur des technologies matures, sans révolution technologique ni solution miracle, sans effort de guerre, en combinant différentes actions et non une seule : 1 quart par la suppression des usages thermiques de l'électricité, 1 tiers par les énergies renouvelables, le reste par les économies d'énergie (électricité, chauffage, transport), avec en parallèle le développement de la cogénération et des réseaux de chaleur.

Il est possible de poursuivre le raisonnement en accentuant ces mesures, tout en restant dans des hypothèses possibles sans rupture technologique majeure, simplement en recourant systématiquement aux « meilleures technologies disponibles ». Une variation annuelle de -1% des besoins d'énergie utile, +1% du rendement énergétique global, +6% de la production des énergies renouvelables, aboutit en 20 ans à diviser par deux la consommation de combustibles fossiles sans recourir au nucléaire.

2. Préambule

2.1 Recommandations de lecture

Cet article commence par une **analyse des bilans sur la production et la consommation d'électricité** en France. Dans un second temps, nous nous intéresserons au **bilan énergétique global**, toutes sources, vecteurs et usages confondus. A partir de ces analyses, nous montrerons dans quelle mesure il est possible **d'améliorer le « rendement global »** de production et d'utilisation de l'énergie, et les pistes permettant de **réduire les consommations d'énergies non renouvelables**.

Il est vivement conseillé de lire ce texte en ayant sous les yeux le fascicule (gratuit et téléchargeable par Internet) « L'énergie en France – repères », Edition 2001, http://www.industrie.gouv.fr/energie/_statisti/pdf/reperes.pdf, ainsi que le « tableau des consommations d'énergie en France » (23 Euros).

Si l'on tient à vérifier les calculs, il est quand même préférable de commencer par une première lecture d'ensemble. Pour ceux qui utilisent habituellement la tep (tonne équivalent pétrole), on verra que pour éviter de jongler entre les unités, la plupart des chiffres sont donnés en térawatt-heures. Pour une conversion rapide en Mtep, il faut diviser les TWh par 10 (plus exactement par 11,62) pour passer aux Mtep (ou par 5 -plus exactement 4,5- quand il s'agit de l'électricité selon l'ancien mode de comptabilité).

Dans la mesure du possible, j'ai cherché des représentations graphiques aussi pédagogiques et claires que possible, mais la comptabilité énergétique est par essence complexe. J'ai reporté en annexe la plupart des détails de calcul ou de méthode.

Il s'agit ici de la version 2. Merci à ceux – néophytes et spécialistes – pour leurs remarques qui m'ont permis de clarifier et enrichir la première version.

2.2 Avant-propos

Les mesures de soutien au développement de la production d'électricité issue d'énergies renouvelables, actuellement en cours d'étude ou d'adoption, suscitent controverses et débats quant à l'importance potentielle de ces sources d'énergie dans le paysage énergétique français.

Les sceptiques mettent en avant la faible contribution potentielle – 40 TWh¹ attendus au total d'ici 2010, dont 30 pour l'éolien – par rapport à la production actuelle². La commission de régulation de l'électricité (CRE juge les tarifs d'achat de l'électricité éolienne trop élevés. EDF justifie une partie de l'augmentation récente du prix de l'électricité par les charges de service public induites par ces tarifs d'achat. Les opposants à l'éolien s'inquiètent d'un impact paysager élevé pour un gain énergétique jugé marginal. D'autant, affirment-ils, que comme la France est excédentaire en électricité, l'éolien sera exporté.

En outre, l'énergie éolienne est « intermittente » : une éolienne ne fonctionne à l'équivalent de sa puissance nominale que 3.000 heures par an. Ce qui revient à dire que non seulement 2,7 GW éoliens ne remplacent que 1 GW nucléaire, mais qu'il faut en outre d'une part, compenser cette intermittence par des centrales thermiques, et d'autre part renforcer le réseau électrique qui serait incapable d'évacuer l'électricité produite à partir de sites éloignés des grands centres de consommation.

Arguments repris également par un rapport parlementaire qui s'inquiète de la place donnée au « tout éolien » et préconise plutôt le recours au solaire et aux biocarburants. Des promoteurs de l'électricité éolienne eux-mêmes partent du même postulat : l'éolien n'a pas vocation à concurrencer le nucléaire, mais à devenir une énergie « d'appoint ». On trouve des arguments analogues au sujet de l'hydroélectricité (le potentiel exploitable ne représente « que » 1 % de l'électricité produite).

Il faut certes rappeler que la capacité éolienne prévue à l'horizon 2010 sera constituée de deux mille parcs éoliens, à comparer aux quelque 270.000 pylônes haute tension qui parsèment le territoire. Que l'investissement éolien n'est pas très différent de celui du nucléaire. Que le renouvellement du parc électronucléaire commencera d'ici à une dizaine d'années, et que les décisions se prennent aujourd'hui : pas d'éolien aujourd'hui, c'est plus de nucléaire demain, à scénario de consommation identique.

Mais il faut surtout **préciser le contexte énergétique dans lequel doivent s'inscrire les énergies renouvelables, qui n'est pas celui de la course à la puissance.**

Le débat énergétique français est habituellement présenté comme un dilemme entre le nucléaire et les énergies fossiles. Moins de nucléaire, c'est l'effet de serre – et certains opposants au nucléaire prônent une phase « transitoire » de substitution par le gaz naturel ou le charbon. Le nucléaire est alors présenté comme un moindre mal – argument relayé y compris dans certains milieux écologistes.

L'analyse exposée ici permet de sortir du dilemme apparent, en replaçant l'analyse énergétique au cœur de la réflexion, par l'articulation entre la maîtrise des besoins, l'efficacité énergétique, et le recours aux énergies renouvelables.

¹ Téravatt-heure : 1 milliard de kilowatt-heure.

² 540 TWh électriques produits en France en 2000

Il est curieux de constater à quel point les chiffres officiels sont aussi peu questionnés. Le mode de comptabilité de l'énergie en France repose sur un système d'équivalence particulier, qui n'a été aligné sur ceux de l'Agence Internationale de l'Energie ou de l'OCDE que depuis 2002.

Ce mode de comptabilité revient à attribuer une place largement excessive au nucléaire et à l'électricité en général. L'électricité focalise d'ailleurs l'essentiel des discours sur l'énergie, alors qu'elle n'est pas – loin s'en faut – la principale forme d'énergie utilisée en France. Sans doute les controverses autour du nucléaire y sont pour beaucoup. Le débat sur l'énergie gagnerait beaucoup si l'on s'intéressait d'un peu plus près à la problématique « chaleur » et d'une façon plus générale à l'ensemble des énergies.

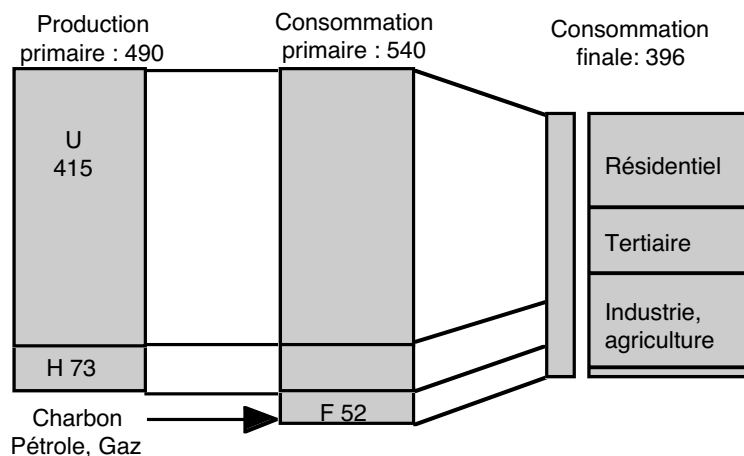
En fait, il faut raisonner exactement à l'inverse : à partir des besoins de chaleur, forme d'énergie qui devrait être replacée au cœur de l'analyse.

3. Production et consommation d'électricité : une lecture des bilans officiels

3.1 Production primaire, consommation primaire, consommation finale

La **production primaire** d'électricité en l'an 2000 – uranium et hydraulique – représente 490 TWh, autrement dit 108 mégatep (Mtep : millions de tonnes-équivalent pétrole)³, dont 415 TWh à partir d'uranium (a)⁴ et 73 TWh à partir de l'hydraulique (b).

S'ajoute à cette production 52 TWh (c) d'origine fossile⁵, produits à partir de 11 Mtep de combustible (à 75 % du charbon). Soit une production totale – appelée « **consommation primaire** » de 540 TWh (d) ou encore « production brute » (e).



³ La tep (tonne équivalent pétrole) est une unité de compte qui permet d'additionner des tonnes de pétrole, des mètres-cubes de gaz, des kilowatt-heures électriques, des stères de bois. 1 tep vaut 11.620 kWh thermiques : soit 1 tonne de pétrole, ou 1,5 tonnes de charbon, 1.000 m³ de gaz naturel, 6,6 stères de bois. Pour l'électricité, 1 tep vaut 4.500 kWh, car on tient compte du rendement des centrales électriques : on considère que 11.620 kWh de combustible (fossile ou nucléaire) fournissent 4.500 kWh électriques (du fait d'un rendement de 4500/11620 = 39 %). **Ces équivalences viennent faire l'objet d'une révision : voir en annexe.**

⁴ Les lettres entre parenthèses renvoient au tableau ci-dessous.

⁵ cette quantité englobe 3,8 TWh (d) d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables hors hydraulique.

Ensuite, on passe à la **consommation finale** d'électricité – celle qui parvient, après transport et distribution, aux compteurs des usagers : 396 TWh (f).

Le détail des consommations ne fait pas apparaître l'origine primaire de l'électricité : on sait que le parc des réfrigérateurs consomme 5 TWh, mais quelle est la part de l'hydraulique et celle de l'uranium ? Ma perceuse est-elle vraiment atomique ?

Les bilans en donnent une répartition par secteurs – habitat, tertiaire, industrie, transports...- et par source. La colonne « électricité » ne permet pas de connaître la part provenant de l'uranium, de l'hydraulique ou des combustibles fossiles⁶ : les statistiques officielles ne donnent pas la ventilation des consommations finales par source de production.

Le tableau ci-dessous présente une tentative de ventilation, à partir des statistiques officielles, en utilisant la grille de répartition explicitée plus loin.

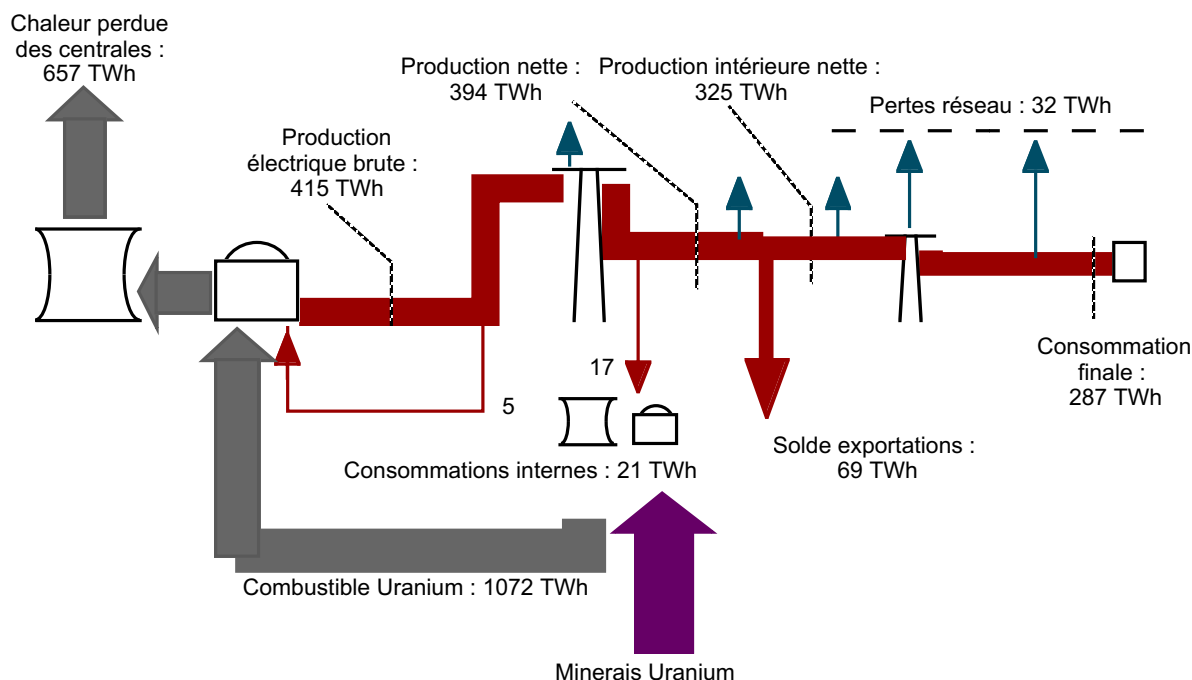
Electricité : de la production brute à la consommation finale⁷, en TWh – chiffres 2000.

TWh	Production brute	Conso. internes	Production nette	Solde exportation	Consommation intérieure nette	Pomp age	Pertes réseau	Conso. finale
Uranium	415 (a)	-22	393	-73	320		-35	285 (k)
Hydraulique	73 (b)	-1	72	-0	72	-7	-4	60 (l)
Fossiles	48 (c)	-1	46	+4	50		-3	48 (m)
Autres renouvelables	4 (d)	-0	4	-0	4		-0	4 (n)
TOTAL	540 (e)	-24 (g)	516	-69 (h)	447	-7 (i)	-44 (j)	396 (f)

⁶ L'électron, comme l'argent, n'a pas d'odeur. Le souci de la rigueur scientifique justifie sans doute que l'on s'interdise de discriminer les électrons distribués par le réseau selon leur origine uranium, hydraulique et fossile, et rien ne permet en effet d'identifier ceux-ci au compteur du consommateur. La rigueur scientifique n'a cependant pas empêché les compte officiels de la nation d'oublier pendant des années l'importance du bois de chauffage, c'est-à-dire quelques 10 millions de tep... Aujourd'hui encore, ces comptes officiels passent sous silence cette énergie, par exemple lorsqu'il s'agit de donner le détail des consommations dans l'habitat, où seules les énergies commerciales, donc « comptabilisables », sont recensées.

⁷ La ventilation des données intermédiaires par source est une estimation fondée sur les hypothèses énoncées précédemment.

Le bilan énergétique de la filière électronucléaire



3.2 La consommation finale : répartition par « secteurs » et ventilation par « source »

Il faut examiner de plus près le bilan, et détailler les postes intermédiaires entre la production primaire et la consommation finale.

Le poste « **autoconsommation** » des filières électricité - 24 TWh (g) - représente la consommation des auxiliaires des centrales : la production annoncée est en effet une production brute, mais il faut en déduire la consommation des pompes et divers appareils qui, au sein même des centrales, consomment une partie de l'électricité produite. S'y ajoute pour l'uranium la fabrication du combustible nucléaire⁸.

La France **exporte** de l'électricité (73 TWh), et en importe un peu (4 TWh, essentiellement d'origine fossile) pour équilibrer l'offre et la demande de façon ponctuelle. Le solde positif est de 69 TWh (h). Les campagnes de publicité ne cessent de nous le rappeler : non seulement le nucléaire a permis à la France d'améliorer son indépendance énergétique, mais en a également fait un pays exportateur d'énergie, vers le Royaume-Uni, l'Allemagne, la Suisse ou l'Espagne⁹. Il n'en reste pas moins que cette énergie, nucléaire donc, ne participe pas à la couverture des besoins internes d'électricité.

⁸ EURODIF est le plus gros consommateur français d'électricité : 17 TWh. Si le nucléaire est une ressource « dense » permettant d'obtenir des puissances unitaires de l'ordre du GW, le combustible brut contient une faible proportion d'uranium exploitable. Il faut enrichir cette ressource à l'origine peu concentrée.

⁹ Il ne faut pas exagérer ces exportations : le solde positif avec l'Allemagne est de 15,2 TWh, soit 2,8 % de sa production d'électricité (source : IEA). Le nucléaire français ne remplacera pas le nucléaire allemand ! En revanche la France doit importer 4 TWh d'électricité produite à partir de charbon pour faire face à la demande.

Le poste « **pompage** », 7 TWh (i), représente les pertes des centrales dites de pompage ¹⁰, et les **pertes sur le réseau**, 44 TWh (j) ¹¹.

Au total, la **consommation finale** de 396 TWh est donc assurée à hauteur de 72 % par l'uranium (k), 16 % par les renouvelables – (l) et (n), 12 % par les combustibles fossiles (m).

3.3 Les usages de l'électricité : des « secteurs » aux « usages »

Posons-nous enfin la question de l'usage de l'électricité. Les données sont cette fois-ci extraites des bilans détaillés des consommations finales **pour l'année 1997**¹².

En utilisant le même raisonnement que précédemment, on aboutit à la répartition suivante en termes de consommation finale d'électricité (TWh) pour 1997 :

Fossiles	37
Uranium	268
Renouvelables	57
TOTAL	362

On connaît d'autre part la répartition par secteur et par usage de ces 362 TWh d'électricité finale. Les statistiques publiées ne permettent pas de distinguer immédiatement les usages de l'électricité selon les deux formes principales (usages thermiques ou usages spécifiques¹³), ni l'origine de l'électricité selon ces usages. J'ai aggloméré les différents types d'usages, à partir des tableaux de consommation détaillée.

Les applications thermiques (chauffage, eau chaude, cuisson) en représentent un peu moins du tiers, et les usages « spécifique » un peu plus des deux tiers.

Consommation finale d'électricité en TWh - Chiffres 1997

	Chauffage, eau chaude, cuisson	Usages spécifiques	Total
Résidentiel	65	62	125
Tertiaire	25	67	92
Industrie, agriculture	22	114	135
Transports		10	10
Total	109	253	362

¹⁰ Il s'agit d'usine hydrauliques dotées d'un réservoir, rechargé lorsque la production d'électricité dépasse la demande (heures creuses) et utilisées pour couvrir les pointes de consommation. Cette énergie est rendue nécessaire par la structure de la consommation d'électricité. Nucléaire et hydrauliques assurent la couverture des besoins « en base », mais les pointes de consommation sont assurées par des centrales capables de démarrer instantanément : turbines à gaz, centrales de pompage. La production des centrales de pompage est comprise dans la production hydraulique.

¹¹ Elles sont dues aux pertes à la transformation (à chaque fois que l'on change de tension de réseau), et aux pertes par effet Joule sur les lignes. Elles sont donc liées à la distance à couvrir entre les sites de production et les lieux d'utilisation. Lorsque la production couvre des besoins locaux, nul besoin des hautes tensions. Plus la production est centralisée, plus les pertes sont importantes.

¹² Il y a un décalage entre la date de publication du bilan énergétique global et la date de publication des consommations détaillées. J'ai exploité les documents à ma disposition, mais il n'y a pas de différences fondamentales entre 1997 et 2000.

¹³ On classe les usages de l'électricité entre chauffage, eau chaude sanitaire, cuisson – que je regroupe dans les « usages thermiques », et usages « spécifiques » : éclairage, moteurs, etc. Ils sont dits « spécifiques » parce que l'on considère que, à la différence des autres, ils ne peuvent pas être assurés par d'autres vecteurs que l'électricité. En réalité une partie de ces usages « spécifiques » sont en fait des usages thermiques : voir en annexe.

On peut tenter de faire le lien entre les sources d'électricité et les usages, selon le raisonnement suivant ¹⁴ :

- On peut faire l'hypothèse que **l'électricité issue des centrales fossiles** couvre en majorité des **usages thermiques** (chauffage), puisque celles-ci sont appelées pour les pointes de consommation dues en grande partie à ces usages (voir en annexe la courbe monotone de consommation) => on affecte les 37 TWh d'origine fossile aux usages thermiques.
- **l'hydroélectricité** n'est pas censée couvrir les besoins thermiques. Historiquement, les usages thermiques de l'électricité ont été développés en concomitance avec l'essor du parc nucléaire : la promotion et l'image du chauffage électrique sont intimement liées au nucléaire (voir en annexe). Le parc hydraulique date pour l'essentiel d'avant l'arrivée massive du chauffage électrique => on affecte les 57 TWh d'origine renouvelable aux usages spécifiques.
- On peut donc admettre que les 109 TWh d'électricité à usage thermique étant couverts par les combustibles fossiles à hauteur de 37 TWh (soit 34 %), l'uranium contribue - par déduction - à hauteur de 72 TWh ¹⁵.
- De même, les 268 TWh d'électricité spécifique étant assurés par les renouvelables à hauteur de 57 TWh (soit 22 %), la contribution de l'uranium est - par déduction - de 197 TWh.

Répartition de la consommation finale d'électricité par source et par type d'usage, en TWh - Chiffres 1997¹⁶

	Total	Uranium	Renouvelables	Fossiles
Applications thermiques	109	72	ε	37
Usages « spécifiques »	253	197	57	ε
Total	362	268	57	37

◆ Quelques conclusions à tirer de cette lecture

La part des Er

L'hydraulique fournit 16 % de la consommation finale d'électricité, et **22 % des usages spécifiques actuels**.

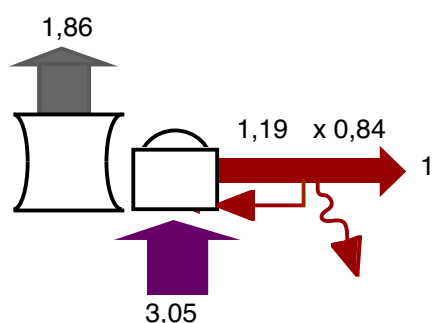
Avec les 45 TWh d'électricité renouvelable supplémentaires d'ici 2010 tels que prévus par les pouvoirs publics, les renouvelables sont susceptibles d'assurer 26 % de la consommation finale actuelle d'électricité, et **37 % des usages spécifiques de l'électricité...**¹⁷

¹⁴ Il s'agit de simplifications dont la cohérence apparaîtra dans la suite de cet article. Mais cette clé de répartition en vaut bien d'autres.

¹⁵ En tep, rappelons que ce chiffre vaut 18 Mtep compte tenu des normes de calcul. A titre de comparaison, on estime la consommation de bois dans l'habitat à 8,8 Mtep, deux fois moins. Ce qui vaut 100TWh en termes d'usage final : c'est plus que l'électricité ex-uranium.

¹⁶ On peut nuancer ce tableau en donnant une valeur un peu plus élevée aux « epsilon », sans changer les conclusions de manière fondamentale.

¹⁷ Le chiffre symbolique de 50 % peut être atteint sans difficultés insurmontables : par exemple avec 1) un effort un peu accru sur les renouvelables de + 50 TWh, soit, avec l'hydraulique et en déduisant les pertes, une fourniture finale de 100 TWh - , et 2) une diminution des consommations sur l'ensemble de 20 %, conduisant à une consommation finale de 200 TWh au lieu de 253 : 20 TWh d'électricité spécifique transférée vers des usages en réalité thermique, 15 TWh gagnés sur l'éclairage (lampes basse consommation), généralisation de l'électroménager de classe A...



Combien de réacteurs « utiles » ?

Les 58 réacteurs nucléaires en France, totalisant une puissance de 62 GW (soit une moyenne de 1,1 GW par réacteur), ont produit 415 TWh électriques en 2000.

Soit 6.700 heures de marche en régime nominal, c'est-à-dire 76 % des 8.760 heures que constitue une année. Ces chiffres représentent non pas la « disponibilité » d'un réacteur, mais la disponibilité globale réelle du parc, prenant en compte les périodes d'arrêt pour entretien et renouvellement du combustible.

L'équivalent de 11 réacteurs fonctionne intégralement pour l'exportation. Sur les 47 qui assurent la consommation intérieure, 3 fonctionnent pour fournir le combustible nucléaire et l'alimentation des auxiliaires des centrales, 5 pour couvrir les pertes au transport et à la distribution d'électricité.

Un « rendement » de la filière électronucléaire de 33 % (ou 28 %)

Le rapport « électricité finale » / production brute d'électricité est de 84 % : 5 % d'autoconsommation et 11 % des pertes. Si l'on raisonne en économies d'énergie, 1 kWh économisé évite donc la production de 1,19 kWh électrique.

S'y ajoute le rendement des centrales, c'est-à-dire le rapport entre l'électricité produite et l'énergie du combustible uranium (« entrée centrale »). Celui-ci est de 39 %, soit 61 kWh de chaleur perdue pour 100 kWh de combustible consommé permettant de produire 39 kWh d'électricité. L'économie de 1 kWh électrique économise donc 3,05 kWh de combustible (nucléaire ou fossile). Soit un rapport de 39 % x 84 % = 33 % entre électricité « finale » et énergie primaire.¹⁸

Chauffage électrique = nucléaire + charbon

Les usages thermiques de l'électricité sont couverts à 34 % par les centrales à combustible fossile¹⁹. Pour 100 kWh électriques utilisés pour le chauffage ou l'eau chaude, on consomme donc 34 kWh électriques produits par des centrales thermiques fossiles. Soit compte tenu des rendements des centrales, 106 kWh de combustible charbon, gaz et pétrole.

¹⁸ Le nouveau mode de comptabilité utilisé en 2002, adopte un rendement des centrales nucléaires de 33 %. Soit un rapport de 33 % x 84 % = 28 % Soit, pour 1 kWh électrique consommé par l'utilisateur, 0,19 kWh électriques perdus en ligne ou autoconsommés, et 2,4 kWh thermiques perdus.

¹⁹ Il s'agit ici de l'ensemble des usages thermiques, dont certains sont réguliers. Si on ne considère que le chauffage, le rapport uranium / fossiles est encore plus faible.

En termes d'impact sur l'effet de serre, **mieux vaut se chauffer directement au gaz** : la consommation d'énergie fossile serait identique²⁰, les émissions de gaz carbonique moindres (le charbon en émet plus que le gaz à énergie égale), sans en outre recourir à l'uranium²¹.

Origine de l'électricité à usages thermiques, pour une consommation finale de 100 kWh

	TOTAL	Uranium	Fossile
Consommation utile	100	66	34
Pertes (production, transport et distribution, utilisation)	223	152	71
Consommation totale (y compris chaleur non utilisée)	324	218	106

1 MW nucléaire = 2 MW éolien et non 3

La disponibilité d'une éolienne (équivalent nombre d'heures de marche à régime nominal) est de l'ordre de 3.000 heures par an, soit un tiers de l'année : trois fois moins que la disponibilité théorique d'une centrale nucléaire.

Si l'on tient compte de la disponibilité réelle du parc électronucléaire, de l'autoconsommation et des pertes en lignes (moins importantes avec l'éolien puisque la production est décentralisée donc consommée localement), le rapport entre la production nette entre nucléaire et éolien n'est plus que de 2, à puissance installée égale.

10.000 MW éoliens peuvent donc se substituer non pas à 3, mais à 5 réacteurs nucléaires moyens.

		Eolien	Nucléaire	Rapport
Puissance installée	MW	1 000	1 000	1,0
Disponibilité théorique	h	3 000	8 760	2,9
Disponibilité réelle du parc	h	3 000	6 700	2,2
Production réelle	TWh	3,0	6,7	
Autoconsommation et pertes en ligne		5 %	16 %	
Total des pertes	TWh	0,2	1,1	
Production nette	TWh	2,9	5,6	2,0

²⁰ voire moindre avec une chaudière à condensation dont le rendement avoisine 99 % : soit 102 kWh fossiles dépensés, 4 % de moins qu'avec le chauffage électrique.

²¹ On peut aussi rappeler que les charges d'impayés d'électricité représentent dans les 100 millions d'euros par an en France. Le chauffage électrique n'obéit à aucune rationalité : ni du point de vue d'EDF, qui doit faire face à des appels de puissance extrêmes et investir dans des centrales appelées quelques centaines d'heures par an seulement ; ni du point de vue de l'effet de serre ; ni du point de vue social.

4. De l'usage rationnel de l'énergie

On apprend, de la lecture des bilans de l'énergie, que les renouvelables représentent une production de 23 à 26 Mtep selon les années, « à comparer » à la consommation d'énergie primaire de 240 Mtep, soit dans les 11 %. Les 10 Mtep – ou 45 TWh électriques – supplémentaires ne porteront cette part qu'à 15 % (si entre temps la consommation n'a pas augmenté).

Les énergies renouvelables sont-elles capables d'assurer une part plus significative de ce bilan ?

Les chiffres annoncés dans les publications du Secrétariat d'Etat à l'Industrie sont impressionnants : pour fournir 1.000 MW (un réacteur nucléaire ; mais pourquoi comparer à une puissance brute ?...), il faudrait 15 km² de capteurs photovoltaïques : on imagine les champs de capteurs ! Ou sinon 30.000 km² de forêt : on oublie de préciser qu'il s'agit de l'accroissement annuel. Surtout, le bois est rarement utilisé pour produire de l'électricité seule : les centrales bois à cogénération produisent autant ou plus de chaleur que d'électricité. Il faudrait donc ajouter 1 ou 2 GW thermiques au 1 GW électrique annoncé. D'ailleurs on l'a vu plus haut : pour assurer un usage équivalent de 1 kWh de chauffage, il faut en dépenser 3 si cet usage est couvert par une centrale électrique de grande puissance. Mieux vaut utiliser le bois localement avec un équipement assurant un rendement global élevé.

La publication de ces chiffres illustre en tout cas que, 1° la « culture énergétique de référence » se fonde comme postulat sur un système centralisé de production d'énergie, 2° que les renouvelables, pour peser significativement dans un système énergétique basé sur la course à la puissance, aboutissent à des chiffres « effrayants ».

Il faut donc aller plus loin dans l'analyse de notre système énergétique. On l'a vu déjà : les usages thermiques de l'électricité ne sont pas des plus efficaces du point de vue de la consommation primaire en énergie.

Si l'on poursuit, en raisonnant en termes énergétiques (les TWh) plutôt que macroéconomiques (les Mtep²²), la France consomme environ 2.543 TWh²³. En bon énergéticien, on distinguera deux types d'usages : la chaleur et le travail²⁴.

²² La mégatep n'est pas une unité physique, c'est une unité de compte utilisée par les économistes de l'énergie.

²³ On devrait plutôt compter en Joules, qui est l'unité du Système International. 2.500 TWh (soit 2,4 10¹⁵ Watt-heures) valent 9 10¹⁸ Joules, soit 9.000 PJ (Petajoules, 10¹⁵). 1 TWh vaut 3,6 PJ. Cette unité de compte, peu usitée par les économistes de l'énergie, a en outre l'avantage de ne pas se référer à une source particulière d'énergie, de façon explicite (la tep = le pétrole) ou implicite (le kWh = l'électricité).

²⁴ Le travail est une forme d'énergie cinétique : il s'agit principalement des moteurs, qu'il s'agisse de celui de votre voiture, de votre machine à laver, de l'ascenseur... Par extension, la notion de « travail » employée ici englobe également, pour simplifier, d'autres formes d'énergie utilisées sous forme lumineuse, électromagnétique, etc, assurées en totalité par l'électricité (depuis la disparition des becs à gaz et à l'exception des lampes à pétrole). Ces deux formes d'énergie n'ont pas la même valeur, dicit Carnot et les lois de l'entropie. D'où le recours à l'analyse en Mtep, mais qui n'a plus de signification lorsque le travail sert à produire de la chaleur...

4.1 Energie utile / énergie dépensée : un rendement global de 51 %

D'où proviennent ces 2.543TWh ? Le graphique ci-dessous donne un résumé de la situation (les numéros sont explicités dans le texte). Nous raisonnerons encore sur l'année **1997**.

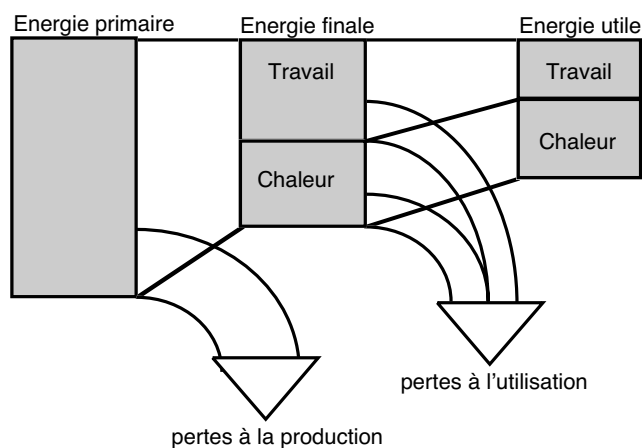
Tentons de reconstituer la structure de la consommation d'énergie en France, à partir des données publiées par l'Observatoire de l'Energie, en distinguant plusieurs niveaux :

- **L'énergie primaire consommée, hors usages non énergétiques** du charbon, pétrole et gaz, et évidemment hors solde d'exportation d'électricité.²⁵
- Les **pertes à la production** englobent les pertes des raffineries (pétrole), des centrales thermiques (chaleur non récupérée, consommation des auxiliaires), et les pertes au transport (électricité). Elles représentent la différence entre l'énergie primaire consommée, et l'énergie dite « finale ».²⁶
- **L'énergie finale**, c'est à dire « au compteur » de l'utilisateur, celle qui lui est facturée.
- Les **pertes à l'utilisation** : à la différence des données précédentes, issues des statistiques, nous avons estimé, pour chaque catégorie d'usage, un rendement énergétique. Ce rendement varie entre 70 et 90 % pour la combustion, selon qu'il s'agisse de bois, charbon, pétrole ou gaz (et selon le secteur : résidentiel, industrie...). Il est de 100 % pour l'électricité. Nous avons adopté une valeur de 30 % pour les carburants automobiles²⁷.
- La **chaleur utile** : c'est la consommation finale, déduction faite des pertes à l'utilisation. La chaleur utile ne tient compte que du rendement des appareils, non du comportement de l'usager ou de ses besoins : la question des besoins relève d'une autre approche, celle de la maîtrise de l'énergie au sens strict (du type changement d'appareils, isolation thermique, etc), qui consistent à réduire les besoins d'énergie.
- Le **travail utile** : idem. Ce terme englobe ici non seulement le travail proprement dit (moteurs électriques ou thermiques), mais aussi l'ensemble des usages non thermiques, dits « spécifiques », de l'électricité (éclairage, électromagnétisme...).

²⁵ On ne tient pas compte ici des consommations d'énergie « hors frontières » : autoconsommations et pertes de pétrole et de gaz lors de l'exploitation des gisements, du transport et du raffinage (pour les produits pétroliers importés).

²⁶ Il faudrait pour bien faire déduire aussi les dépenses d'énergie nécessaire au transport et à la distribution des combustibles sur le territoire national (pipelines et gazoducs, camions-citernes...).

²⁷ Il s'agit ici des rendements « générateurs », supérieurs aux rendements réels qui incluent la régulation, l'intermittence, etc. Ainsi, pour les véhicules, le rendement de 30 % est celui du moteur et non celui de l'ensemble propulsion.



Bilan énergétique national : répartition selon les sources, les secteurs et les usages finaux, en TWh (à partir des chiffres 1997)

Forme	SECTEUR	Fossile	Uranium	Renouvelable	Total
Chaleur	AGRICULTURE	18	2	0	20
	INDUSTRIE	265	12	17	293
	RESIDENTIEL	299	41	66	406
	TERTIAIRE	128	16	9	154
	Total	709 (4)	71 (5)	92 (6)	872
Travail	AGRICULTURE	3	0	0	3
	INDUSTRIE	15	84	26	125
	RESIDENTIEL	0	48	14	62
	TERTIAIRE	0	52	15	67
	TRANSPORTS	167	7	2	176
Total	185 (1)	192 (2)	57 (3)	434	
Consommation utile		894	263	149	1 306
Chaleur	AGRICULTURE	4	0	0	4
	INDUSTRIE	29	1	2	33
	RESIDENTIEL	49	2	28	79
	TERTIAIRE	21	1	2	24
	Total	103	4	32	140
Travail	AGRICULTURE	6	0	0	6
	INDUSTRIE	1	4	1	7
	RESIDENTIEL	0	0	0	0
	TERTIAIRE	0	0	0	0
	TRANSPORTS	390	0	0	390
Total	397	5	1	403	
Pertes consommation		500 (7)	9	34	543
Pertes production		113 (8)	570 (9)	11	694
Total		1 507	842	195	2 543

L'uranium représente (déduction faite du solde exporté) 842 TWh ou 72 Mtep d'énergie primaire, dont 263 TWh électriques utiles, et le reste (9) est perdu²⁸ : chaleur inutilisable des centrales nucléaires, autoconsommation des auxiliaires et pertes du réseau, pompage, pertes à l'utilisation (rendement de régulation du chauffage). Sur ce total, on l'a vu, 72 TWh fournissent de la chaleur utile (5) et 197 du travail utile (2)²⁹.

²⁸ Les chiffres entre parenthèses renvoient au tableau ci-dessus et au graphique ci-dessous.

²⁹ au sens large, comme indiqué plus haut, donc y compris lumière et transmission d'information

Les **énergies renouvelables** totalisent 195 TWh, dont 57 TWh (**3**) d'énergie finale pour des usages spécifiques de l'électricité (essentiellement à partir de l'hydraulique) , et 92 TWh pour des usages thermiques (**6**) : il s'agit surtout du bois énergie pour le chauffage des logements, ainsi que dans l'industrie, et des déchets municipaux, des biocarburants, des résidus de culture, de la géothermie, du biogaz... La chaleur utile prend en compte un plus faible rendement, surtout pour le bois énergie utilisé dans l'habitat, ce qui explique un niveau de pertes élevé à l'utilisation.

Les **combustibles fossiles** quant à eux représentent 1.507 TWh, principalement pétrole (901 TWh), puis gaz (400 TWh), et charbon (102 TWh)³⁰. S'y ajoute une fraction aujourd'hui faible (104 TWh) utilisée pour produire de l'électricité, principalement à partir du charbon pour, on l'a vu, des usages surtout thermiques de l'électricité.

Plus de la moitié des combustibles fossiles (811 TWh) est utilisée pour des **usages thermiques directs** (chaudières, fours...). Le reste – issu essentiellement du pétrole - sert aux **transports** : près de 557 TWh. Or, les moteurs à explosion obéissent, comme les centrales thermiques, aux lois de la thermodynamique : il faut 3 kWh de combustible pour produire 1 kWh d'énergie mécanique. L'énergie « utile », transformée en énergie cinétique, n'est donc au mieux que de 167 TWh (**1**).

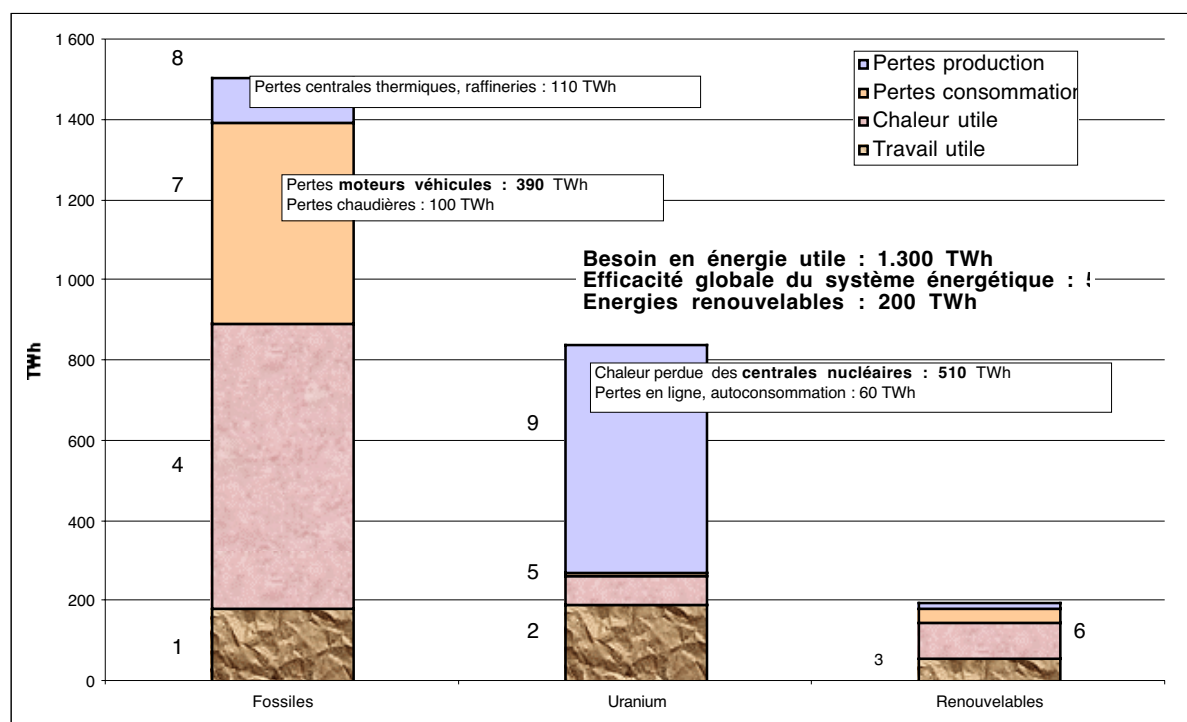
Pour les applications thermiques, l'énergie utile est assez voisine de l'énergie consommée : les rendements des chaudières sont le plus souvent de l'ordre de 80 à 90 % - moins pour les plus anciennes chaudières à fioul, plus pour les chaudières à gaz à condensation.

Au total, les besoins **d'énergie utile sous forme de travail atteignent 434 TWh**, et les **besoins thermiques 872 TWh**, soit un total de 1306 TWh. Le **rendement global du système énergétique français est donc de 1306 / 2543 = 51 %**.

49 % de l'énergie est donc « perdue » (c'est-à-dire non utilisée pour fournir un service) : 27 % à la production et à la distribution – principalement la chaleur non utilisée des centrales nucléaires et thermiques, les consommations de leurs auxiliaires et les pertes en ligne ; 21 % à l'utilisation, principalement du fait des rendements des moteurs pour véhicules.

³⁰ On ne tient pas compte ici des usages « non énergétiques » de ces combustibles, qui peuvent être utilisés comme matière première pour la production de plastiques, engrais, acier...

Bilan énergétique national : répartition selon les sources et les usages finaux, en TWh (à partir des chiffres 1997)



Quelques remarques à cet égard :

- Cette notion de rendement énergétique global est inusitée et mériterait un développement plus approfondi
- Toute politique de maîtrise de l'énergie devrait viser à améliorer ce rendement global, ce qui implique de pouvoir le mesurer statistiquement
- La présentation des bilans énergétiques nationaux en « Méga tonnes équivalents pétrole » accorde une place surévaluée à l'uranium³¹

4.2 Maximiser le rendement exergetique

L'usage rationnel de l'énergie consiste à réduire cet écart entre l'énergie utile et l'énergie primaire (celle qui est consommée pour fournir cette énergie utile).

On voit immédiatement où se situent les principaux écarts : **ce sont les systèmes de production de « travail » (énergie électrique ou mécanique) où la chaleur n'est pas utilisée, puisque sans adéquation avec un usage possible**. 506 TWh de chaleur nucléaire inutilisable, 390 TWh de chaleur ex-pétrole dissipés par les radiateurs de nos véhicules.

³¹ Rappelons que 1 tep = 4.500 kWh lorsqu'il s'agit d'électricité, et 11.620 kWh lorsqu'il s'agit de combustibles, selon les équivalences officielles. En effet, il faut consommer 11.620 kWh de combustible – nucléaire ou fossile – pour produire 4.500 kWh électriques, du fait du rendement de Carnot. Ainsi, les 842 TWh nucléaires représentent 72 Mtep, alors qu'ils ne fournissent que 263 TWh électriques, tandis que les 1507 TWh fossiles pèsent 130 Mtep – soit 1,8 fois plus – pour 894 TWh utiles – 3,4 fois plus. Le gaz naturel à lui seul représente 370 TWh en 1997 (hors usages non énergétiques), sa contribution au bilan énergétique national, en termes « d'énergie utile », est supérieure à celle de l'uranium, alors qu'il n'est compté qu'à hauteur de 32 Mtep dans le bilan national.

Impossible en effet de récupérer la chaleur des centrales nucléaires (il faudrait les installer près des agglomérations) ou des véhicules (le chauffage des voitures ne représente qu'une très faible fraction de l'énergie consommée). Logiquement, on cherchera donc des systèmes énergétiques permettant une valorisation optimale de la chaleur et du travail.

a) Les transports.

Face à l'hégémonie du moteur à explosion (gazole, essence, GPL, GNV), quelles sont les solutions existantes aujourd'hui pour améliorer l'efficacité énergétique du système « transport » ?

L'amélioration du **rendement** des moteurs thermiques (plus exactement de l'ensemble propulsion) peut aboutir à des économies non négligeables, puisque l'on sait construire des véhicules économes, très peu consommateurs.

Le passage à la **pile à combustible**, pour demain ou après-demain, constitue un pas de plus, permettant d'économiser 30 à 40 % de carburant – mais la question du combustible (méthanol, hydrogène), du rendement de sa production, de la source d'énergie utilisée pour produire celui-ci, reste posée.

Enfin le **moteur électrique** constitue sans doute le moyen le plus performant, à l'utilisation. Dans l'idéal, la généralisation du moteur électrique à l'ensemble du parc de véhicules permettrait de pratiquement diviser par trois la consommation de ce secteur (voir en annexe)³². Dans la pratique, le véhicule électrique est pour le moment réservé à des transports sur courtes distances (la majorité des déplacements mais pas la majorité de la consommation), notamment la « seconde voiture » des ménages qui ne pourraient pas s'en passer.

Les véhicules **hybrides**, propulsés en partie par de l'électricité (déplacements courts de type urbains) ou par un moteur thermique (déplacements longs), peuvent constituer une partie de la réponse³³.

On peut noter tout l'intérêt – du strict point de vue de l'usage rationnel de l'énergie - des **transports en commun** de type train, métro, tram, utilisant de l'énergie électrique, et qui sont donc potentiellement des modes de consommation de l'énergie parmi les plus performants³⁴.

b) La cogénération.

On a vu que globalement, l'énergie utile représente 1.306 TWh, dont 33 % sous forme de travail. Ce ratio est celui d'un rendement qu'il est aisé d'obtenir avec des machines classiques, type moteur, y compris pour des petites puissances, ou avec des turbines à gaz ou vapeur, pour des puissances modérées.

³² A la différence de toutes les autres technologies, y compris les piles à combustible, l'énergie embarquée est directement transformable, théoriquement sans pertes, en travail. Les pertes au stockage compensent en partie cet intérêt.

³³ A la condition que les batteries soient rechargées sur le réseau (électricité produite par cogénération). Sinon, le seul gain par rapport à un véhicule classique, réside dans l'amélioration apportée par un régime de fonctionnement plus constant du moteur.

³⁴ Du point de vue énergétique pur, et indépendamment de leur intérêt majeur et reconnu du point de vue de la problématique transport (pollution urbaine, emprise, etc). Encore faut-il que cette électricité ne soit pas elle-même produite par un système dont le rendement global ne dépasse guère les 30 % ! Rappelons également que, quelque soit le combustible ou le mode de propulsion, rien ne remplacera une politique d'urbanisme pour maîtriser les transports.

De nombreux énergéticiens dénoncent depuis longtemps, avec vigueur et avec raison, la faible performance énergétique des systèmes de production d'électricité sans valorisation de la chaleur « perdue ». On doit aussi s'insurger de la même façon **contre les utilisations purement thermiques** : certes, le bilan énergétique (au sens de l'**enthalpie**) d'une chaudière est élevé (disons 0,9 kWh produits pour 1 kWh consommé), mais il convient également de raisonner en « **bilan exergetique** » (voir en annexe).

La chaleur, à l'inverse de l'électricité, se stocke plus facilement qu'elle ne se transporte. Pour l'utiliser de façon optimale, il faut donc **produire la chaleur là où on la consomme**. Ce qui impose une production sur place (près du consommateur), donc décentralisée.

Le recours à la cogénération pourrait devenir une priorité, voire une obligation, pour l'industrie. Ce secteur présente la caractéristique d'une consommation plus concentrée que le secteur habitat - tertiaire, et où la sécurité de l'approvisionnement en énergie constitue un enjeu stratégique ³⁵.

c) Micro, mini, méga réseaux de chaleur : un vrai service public de l'énergie

La cogénération n'est pas réservée qu'aux grandes installations industrielles et tertiaires. Elle peut s'appliquer également au secteur résidentiel, via des chaufferies urbaines équipées d'unité de cogénération et alimentant un **réseau de chaleur**³⁶. Ce système de « chauffage central collectif » peut se réaliser à l'échelle d'une ville, d'un quartier, d'un groupe d'immeubles, d'un immeuble unique.

Ces centrales d'énergie, peuvent représenter une puissance suffisante pour justifier, du point de vue économique, l'installation d'une unité de cogénération, capable en outre d'être alimentée par des combustibles variés, d'emploi difficile à l'échelle individuelle : charbon (ne pas oublier qu'il s'agit de la ressource fossile la plus longtemps disponible et la mieux répartie), biomasses diverses plus ou moins élaborées (bois de rebut, biogaz, gaz de biomasse, biocombustibles, déchets), géothermie... Le chauffage dit « urbain »³⁷ est une solution permettant de **tirer parti pleinement de ressources locales**.

La reconnaissance d'un « droit à l'énergie » et l'établissement de tarifs sociaux, les principes de péréquation de tarif, de continuité de fourniture, qui fondent le principe du service public, ne devraient pas être réservés à la seule électricité.

Il faut au contraire raisonner en termes de service final, et affranchir le service public de l'énergie du seul vecteur électricité, pour l'étendre aussi à la fourniture de chaleur et d'eau chaude. Le réseau de chaleur, qui permet de promouvoir une synergie, une optimisation entre les ressources - électricité, gaz, fioul, et renouvelables – jusqu'à présent en concurrence auprès de l'utilisateur final, semble bien la voie la plus appropriée, partout où cette solution est techniquement envisageable.

³⁵ L'industrie, les plus importants établissements tertiaires ou collectifs (hôpitaux) se prêtent bien à la cogénération d'un point de vue technique, qui permettrait d'une part d'optimiser l'emploi des combustibles fossiles et d'autre part de sécuriser les approvisionnements. Depuis le 11 Septembre 2001, on a pris conscience de la fragilité de notre « indépendance » énergétique : il s'agit plutôt d'une addition d'une dépendance à une source (le pétrole) à une dépendance à un mode de production (les centrales nucléaires).

³⁶ Les réseaux de chaleur ne sont guère développés en France, malgré leur intérêt majeur du point de vue énergétique. Pourtant, ils ne sont guère plus coûteux que d'autres réseaux – l'eau potable, les eaux usées – qui équipent la majorité des logements, y compris en zone d'habitat dispersé. En outre, il faut se souvenir que 80 % de la population vit en agglomération.

³⁷ Ce type de chauffage peut aussi s'appliquer en milieu rural, en raccordant sur un même réseau de chauffage plusieurs bâtiments – mairie, école, poste, résidences... - pourvus qu'ils ne soient pas trop éloignés les uns des autres.

Il s'agirait alors d'organiser le service public au niveau de la distribution, donc à un niveau local, intermédiaire entre les grands systèmes centralisés, et les tentatives de recherche de l'autonomie individuelle ³⁸.

d) De la logique d'effets d'échelle à celle d'effet de série

La logique **d'effet d'échelle** consiste, pour des raisons technico-économiques, à privilégier la taille – en l'occurrence la puissance – pour minimiser les coûts de production. Cette logique a jusqu'à présent prévalu dans les grandes orientations de la politique énergétique française.

Une autre logique tend à s'y substituer, celle de l'**effet de série**. Grâce à la production en série, les coûts des unités décentralisées de cogénération peuvent être comparés à ceux offerts par les grandes unités de production ³⁹.

Au contraire de l'effet d'échelle, l'effet de série permet de s'engager vers la miniaturisation des systèmes énergétiques.

◆ **Mr Jourdain fait de la cogénération**

Chacun d'entre nous pratique quotidiennement la cogénération : dès lors que vous prenez votre voiture, vous démarrez un moteur thermique, qui produit deux fois plus de chaleur perdue que d'énergie de propulsion (travail)...

Démontez votre moteur, installez le dans votre garage à côté de votre chaudière – il peut fonctionner au fioul, au gaz naturel, au propane, à l'huile de colza. Achetez une voiture électrique (ou plutôt hybride pour assurer une autonomie suffisante pour les trajets plus longs). Le moteur recharge les batteries et le cumulus d'eau chaude sanitaire - en fait, il suffit d'un petit générateur de 2 kW e (vingt fois plus petit qu'un moteur) fonctionnant 5 heures par jour.

Passons aux chiffres : vous consommez 3.500 kWh par an pour produire votre eau chaude sanitaire (soit 360 litres de fioul), et 1.000 litres de carburant pour vous déplacer (7 l / 100 x 15.000 km). Soit un total de 14.300 kWh par an. L'énergie utile représente 3.000 kWh pour l'eau chaude (rendement de 86 %) et 3.200 kWh pour la voiture (rendement de 30 %), et les pertes 8.100 kWh. Avec la cogénération, en consommant 975 litres de fioul, soit 9.600 kWh, vous produisez 34 % = 3.200 kWh électrique (la consommation de la voiture), et 45 % = 4.400 kWh de chaleur, soit 3.000 kWh d'eau chaude plus 700 kWh disponibles pour le chauffage la moitié de l'année. Soit une diminution de la consommation Carburant + Eau chaude de 4.800 kWh : un tiers d'économies globales, un peu plus en comptant l'économie sur le chauffage.

Une solution coûteuse et/ou compliquée ? L'entretien du moteur ne coûtera pas plus cher que s'il était resté sur votre véhicule, et sans doute beaucoup moins puisqu'il ne sera pas soumis à des changements de régime intempestifs et des conditions de marche variables. Un moteur « en poste fixe » peut fonctionner habituellement au moins 30.000 heures avant sa première grosse révision : soit, à 50 km/h, l'équivalent de 1,5 millions de kilomètres – à comparer aux 15.000 km par an, que parcourt en moyenne chaque véhicule particulier en France. Encore faut-il bien entendu qu'un tel système soit commercialisé, mais on le voit, les obstacles technologiques ou économiques ne semblent pas insurmontables. Tout est question d'effet de série.

³⁸ Organisations qui peuvent aussi participer du maintien de lien social de proximité. C'est une vraie révolution culturelle : on ne produirait plus seulement « du haut » vers « le bas », mais aussi dans le sens contraire. Les administrations en charge du secteur de l'énergie, comme les grands opérateurs, savent très bien gérer quelques millions de points de distribution, mais imaginent encore mal gérer quelques dizaines de milliers de points d'injection sur le réseau.

³⁹ Les petites centrales offrent un rendement électrique moindre que les grandes, mais ceci est compensé par de moindres pertes à la distribution. Surtout c'est le rendement global qui importe : alors que les centrales électriques les plus perfectionnées peinent à atteindre des rendements électriques de 55 %, la plus simple des cogénérations dépasse de loin ce niveau, en rendement global.

5. ME + URE + ER = Equation gagnante

Le paysage énergétique est déterminé par une équation matricielle de type :

$$\{ \text{Consommation} \} = \{ \text{besoin} \} \div \{ \text{rendement} \} \times \{ \text{source d'énergie} \}$$

Nous définirons trois types d'intervention :

- La maîtrise de la demande au sens strict, vise à **réduire les besoins d'énergie**. Il peut s'agir de mesures de type isolation thermique, changement d'appareils électriques, qui visent à assurer le même service pour l'utilisateur. Il s'agit également de mesures qui visent à modifier ce service : par exemple la substitution du transport en commun aux déplacements par véhicules individuels, la diminution des trajets par des politiques d'urbanisme, des choix de production industrielle.
- L'usage rationnel de l'énergie englobe toutes les actions permettant **d'améliorer le rendement global**, qu'il s'agisse des rendements unitaires des appareils (chaudières), que de l'adéquation des besoins et de la production (chaleur, travail), pour un type donné de demande, au niveaux micro et macroéconomique.
- Les actions sur les sources d'énergie visent à diminuer ou annuler le recours aux énergies fossiles, uranium compris, par leur **substitution par des sources d'énergies renouvelables**.

5.1 Réduire les besoins

Appareils électroménagers économes (classe A ou label Energy+), lampes fluocompactes, isolation thermique, urbanisme, politique des transports, amélioration des process industriels, entretien des véhicules, moteurs à vitesse variable, régulation... On peut dresser tout un catalogue des mesures permettant de réduire les besoins en énergie (souvent avec un surcoût nul ou faible). De nombreux gisements ont été identifiés, certains exploités, et pour la majorité d'entre eux encore en friche. Sans entrer dans ces détails poste par poste, on peut affirmer que ce gisement est considérable.

Ainsi, l'éclairage domestique représente 11 TWh, et la généralisation des ampoules fluocompactes représente à elle seule un gisement d'économies de 8 TWh (soit 1,5 réacteur nucléaire), sans effort économique puisque le surcoût à l'achat est amorti sur la durée de vie de l'ampoule.

5.2 L'usage rationnel de l'énergie

L'amélioration de l'efficacité du système énergétique actuel – rappelons qu'il s'agit de gagner un facteur 2 ! - passe par :

- La **suppression de toutes les applications thermiques de l'électricité** (y compris certains usages dits spécifiques, qui sont en fait des usages thermiques), qui serait strictement **réservée aux applications spécifiques** (énergie cinétique : moteurs électriques, propulsion ; éclairage ; énergie électromagnétique...) ⁴⁰.
- La généralisation de la **cogénération et des réseaux de chaleur**, en remplacement des chaufferies simples et des centrales thermiques.
- L'évolution du parc de **véhicules vers des moteurs performants** : véhicules électriques (transports en commun, véhicules individuels), piles à combustibles, véhicules sobres.

5.3 Les énergies renouvelables

a) Le solaire indirect

Les énergies solaires indirectes – flux **hydraulique et éolien** – sont susceptibles d'assurer une part importante des besoins en travail ⁴¹. La production hydraulique est de 70 TWh ⁴². Le PNLCC fixait à 3 GW (10 TWh) la puissance éolienne à installer d'ici 2010, objectif révisé à 10 voire 12 GW (35 TWh) de façon à atteindre les objectifs fixés par la Directive Electricité renouvelable. En Allemagne, la puissance éolienne installée fin 2001 avoisine déjà 9 GW, ce qui rend parfaitement crédible l'objectif fixé à l'horizon 2010 par la France, qui dispose d'un gisement bien supérieur ⁴³. Une production totale de 100 TWh hydraulique + éolien est réaliste à court terme, et peut doubler à moyen terme.

A plus long terme, le photovoltaïque sera capable d'apporter une contribution significative, ainsi que les énergies de la houle et d'autres formes d'énergie de la mer. De même la géothermie, énergie terrestre cette fois-ci, qui peut être convertie en chaleur ou en électricité, selon le niveau de température.

⁴⁰ Rappelons que l'électricité est une forme élaborée de l'énergie, bien plus difficile à produire que la chaleur. Les usages spécifiques requièrent également une qualité élevée (tension, fréquence, absence de perturbations, continuité d'approvisionnement, sans détailler la question des harmoniques et du réactif...) qui ne sont absolument pas nécessaires si cette électricité est utilisée dans de simples résistances à effet Joule... C'est un peu comme le fait de mélanger sur le même réseau, de l'eau potable (usage essentiel, qualité irréprochable) et de l'eau destinée à arroser le jardin (usage accessoire, qualité moindre), et de payer la seconde au prix de la première.

⁴¹ Les énergies hydraulique, éolienne, marémotrice... sont issues de fluides en mouvement (l'air, l'eau), mouvement dont le moteur est l'énergie solaire. Il s'agit déjà d'une forme de travail, qui peut être directement convertie en électricité ou en énergie mécanique. Les utiliser pour des usages thermiques est un contresens du point de vue énergétique, sauf lorsqu'elles sont surabondantes : ce peut être le cas dans les régions richement dotées en vent et pauvres en biomasse ou solaire (régions polaires ou montagneuses par exemple).

⁴² ± 5 TWh selon les années. Il existe un potentiel supplémentaire entre 4 et 8 TWh (optimisation aménagements existants et nouveaux aménagements).

⁴³ Le gisement éolien français est estimé à 50 à 75 TWh terrestres, plus 475 TWh off-shore. Source : Border Wind, juin 1998, in « Energie décentralisée 2020-2050 », F. Benkhelifa et M. Labrousse, EXPLICIT. <http://www.plan.gouv.fr/organisation/seeat/Clubenergie/rapport00/Etude%204.pdf>. Cette étude dresse l'inventaire des technologies de cogénération et de production non centralisée d'électricité.

S'y ajoute la **biomasse**. Elle contribue déjà à hauteur de 120 TWh aujourd'hui au bilan énergétique national. La biomasse est une forme de conversion indirecte de l'énergie solaire : il s'agit aussi bien du bois que des résidus de culture, du biogaz, des cultures énergétiques (pour produire des biocarburants... plutôt destinés à la cogénération qu'à la propulsion automobile !), de la part « biomasse » des déchets... La productivité théorique des 15 millions d'hectares de la forêt française (accroissement annuel) représente un gisement de 500 TWh – y compris le bois d'œuvre et le bois d'industrie pouvant, en fin de vie, produire de l'énergie : déchets de bois, papiers et cartons.

Les 31 millions d'hectares de surface agricole génèrent des résidus générés à chaque stade de la consommation : récolte (pailles et résidus de culture), transformation par l'agroalimentaire (déchets de transformation, eaux usées), consommation par les ménages (déchets ménagers, eaux usées urbaines), y compris les cycles passant par les animaux (aliments pour bétail, déjections d'élevage) ...

L'essentiel du carbone fixé annuellement par la biomasse produite sur le territoire finit par se retrouver, par une voie ou par une autre, directe ou indirecte, après transformation simple ou complexe, sous une forme destinée à être restituée au sol et/ou transformée en gaz carbonique⁴⁴. Celle-ci peut au passage être détournée pour produire de l'énergie, sous réserve de respecter l'équilibre carbone des sols. La forêt n'a guère ce genre de problème, mais le potentiel techniquement mobilisable est limité par l'accessibilité du gisement. Globalement, la biomasse produite sur le territoire national représenterait un gisement de l'ordre de 1.500 TWh, et il doit être possible d'en mobiliser entre 300 à 500 TWh – trois à quatre fois plus qu'aujourd'hui⁴⁵.

b) Le solaire direct

Le rayonnement solaire sous nos latitudes dépasse 1.000 kWh par m² et par an. L'énergie reçue par l'ensemble des toitures des bâtiments en France (habitations, bureaux, usines, entrepôts...), est équivalente à la totalité de notre consommation d'énergie... mais elle n'est utilisée qu'à hauteur de un dix millième : 0,2 TWh⁴⁶. L'objectif fixé par la France pour 2010 est de 2 millions de m² de capteurs solaires, soit de l'ordre de 1 TWh.

L'utilisation directe de l'énergie solaire pour des besoins thermiques (eau chaude et chauffage) est limitée d'une part par l'adéquation entre besoins et ressource (la saisonnalité est inversée), et d'autre part par le taux de pénétration du solaire (capacité de production industrielle, installation).

Pour le premier point (abordé en annexe) : en fixant comme limite une productivité minimale de 350 kWh/m² environ, la production solaire pourrait atteindre 250 TWh avec 800 millions de m² installés – ce qui représenterait 20 à 30 m² par « équivalent logement », en comptant les bureaux -, soit la moitié des besoins eau chaude + chauffage du résidentiel et tertiaire.

⁴⁴ la différence provient principalement du carbone dégagé par la respiration

⁴⁵ La méthanisation de l'ensemble des résidus de récolte, déjections d'élevage, déchets organiques (déchets solides, boues d'épuration) des ménages et industries, permettrait de recycler la matière organique aux sols sans perte de leur fertilité puisque le carbone « stable », celui qui contribue à la formation d'humus, est préservé au cours de ce processus, de même que les fertilisants (NPK). Le potentiel représente 200 à 300 TWh. Le bois-énergie, représente aujourd'hui près de 100 TWh, et la production pourrait être triplée en prélevant l'accroissement annuel non utilisé pour le bois d'œuvre et le bois d'industrie, ce qui permet en outre de consolider une saine gestion des espaces forestiers. Peuvent s'y ajouter cultures énergétiques et taillis à courte rotation.

⁴⁶ Il s'agit d'énergie thermique. L'électricité photovoltaïque représente 0,003 TWh.

Pour le second point (voir également en annexe) : pour installer 800 millions de m² de capteurs solaire en 40 ans, le rythme doit s'élever à 20 millions de m² par an (contre moins de 100.000 aujourd'hui), ce qui représenterait un potentiel industriel relativement important (de l'ordre de 50.000 emplois directs chez les constructeurs) mais qui n'est pas irréaliste. L'obstacle le plus important à lever reste plutôt la décision des maîtres d'ouvrage, publics et privés ⁴⁷.

L'énergie solaire peut être utilisée sous forme de chaleur (c'est le plus simple), ou via la conversion photovoltaïque en électricité. Bien qu'il s'agisse d'une énergie promise à un bel avenir, des progrès significatifs sont à attendre pour penser à un développement massif de cette technologie, en dehors de ses niches actuelles d'application) ⁴⁸.

5.4 Un scénario de sortie du nucléaire

L'analyse présentée ici relativise largement la place généralement accordée au nucléaire dans les esprits. Il est bien évident que le remplacement des centrales nucléaires par des centrales au gaz, dans la même logique de production centralisée (centrales à cycle combiné, sans récupération de la chaleur perdue), générerait une consommation d'énergie fossile supplémentaire de 700 TWh d'énergie primaire pour **280 TWh** électriques produits, insupportable à tous points de vue, puisque les consommations d'énergie fossile augmenteraient de presque 50 %.

La logique à suivre serait toute autre.

◆ Un : suppression des applications thermiques de l'électricité

En premier lieu, on a vu que les usages thermiques de l'électricité ne contribuent pas à la maîtrise des consommations d'énergies fossiles et des émissions de gaz à effet de serre, et qu'ils peuvent être supprimés sans regret – d'autant que la chaleur produite à partir d'électricité est coûteuse pour le consommateur⁴⁹.

Bilan : **80 TWh** électriques économisés sans consommation supplémentaire d'énergie fossile -> reste 200 TWh.

⁴⁷ L'objet de l'article n'est pas de discuter des moyens d'atteindre ces objectifs. On peut cependant imaginer une démarche en trois temps : impulsion (subventions, comme actuellement, ce qui permet de familiariser le public avec le solaire), réglementation (politique volontariste pour accélérer la diffusion du solaire, comme à Barcelone, où la Ville impose le recours au solaire dans les bâtiments neufs), banalisation (le solaire fait partie intégrante des schémas mentaux, son choix ne se pose pas plus que de décider ou non de se raccorder sur le réseau électrique ou l'eau potable).

⁴⁸ On peut en outre imaginer la cogénération solaire. Il suffit de disposer d'un fluide capable de s'évaporer – soit de l'eau avec des capteurs à concentration, soit un fluide thermique comme ceux utilisés dans les installations de climatisation ou les pompes à chaleur. Les moteurs Stirling (dits « à combustion externe ») sont également capables de fournir de l'électricité à partir d'un fluide chauffé par de l'énergie solaire, une chaudière (à bois) ou toute autre source de chaleur. Cette technologie n'existe pas aujourd'hui sur le marché, mais on ne voit pas en quoi elle serait si complexe ou coûteuse, par rapport à un moteur thermique d'usage quotidien aujourd'hui...

⁴⁹ Ceci concerne notamment 6 millions de logements et 160.000 m² du secteur tertiaire. Le coût d'investissement pour le remplacement du chauffage électrique par du chauffage central gaz ou fioul, est inférieur à celui du remplacement des centrales électriques (semi-base et pointe) actuelles, auquel s'ajoutent les coûts d'exploitation, de démantèlement, de gestion des déchets et du risque. A raison de 7.000 euro par logement, l'investissement serait de 40 milliards d'euros. Les ménages qui ne parviennent plus à faire face à leurs charges – près de 100 millions d'euros versés annuellement par les fonds sociaux pour les impayés d'électricité - devraient être favorables à cette mesure.

◆ Deux : économies d'électricité, éolien

Une partie peut être assurée par les énergies renouvelables. L'objectif de 45 TWh en 2010 est à la fois ambitieux par rapport à la situation actuelle, mais modeste vis à vis de la réalité allemande comme du gisement français. L'exploitation du potentiel off-shore éolien devrait devenir une réalité à l'horizon 2010, et nous adopterons un potentiel supplémentaire court/moyen terme de 60 TWh à partir essentiellement de l'éolien.

Une autre partie (disons 40 TWh) peut être assurée par les économies sans surcoût ⁵⁰ – ampoules basse consommation, électroménager sobre, moteurs à vitesse variable... (voir en annexe).

Bilan : 60 + 40 = **100 TWh** d'électricité « spécifique » économisés, ou produits par des sources renouvelables -> reste 100 TWh.

◆ Trois : cogénération

Le solde d'électricité spécifique à fournir (**100 TWh**) est à assurer par cogénération, en priorité à partir des plus importantes chaufferies – industrielles, collectives, tertiaires. En supposant un fonctionnement en semi-base, 4 à 6.000 h par an, la puissance électrique nécessaire serait de 17 à 25 GW ⁵¹.

Le surplus de consommation d'énergie fossile ne serait alors que de 110 TWh (en tenant compte des pertes à la distribution et (très peu) au transport), soit seulement 7 % de plus que la consommation actuelle de pétrole, gaz et charbon cumulés.

Ce scénario montre qu'une sortie du nucléaire au prix de mesures économiquement raisonnables et techniquement simples ⁵², n'engendre pas le cataclysme annoncé d'une hausse spectaculaire de la consommation d'énergies fossiles. Le bilan, c'est que l'on peut remplacer 62 GW nucléaires par 20 GW en petites centrales thermique de cogénération et en ne consommant que 7 % d'énergie fossile supplémentaire⁵³.

A ce stade, la question de sortie du nucléaire se pose donc ainsi : en orientant prioritairement les 6 milliards d'euros investis annuellement dans le secteur de l'énergie, vers la maîtrise de l'énergie et les énergies renouvelables, il devrait être possible d'exploiter un gisement d'économies d'énergies fossiles qui serait très supérieur à cette surconsommation.

◆ Quatre : économies de chaleur, biomasse, solaire

Pour atteindre en outre les objectifs de lutte contre le changement climatique, il faudra en effet aller plus loin : il s'agit de trouver le potentiel correspondant – **110 TWh**, soit 4 % de la consommation totale actuelle - à la fois :

- dans les économies d'énergie pour le chauffage (rénovation thermique des bâtiments...)
- et le développement des énergies renouvelables (bois, solaire, biogaz, géothermie...).

⁵⁰ Le surcoût éventuel à l'achat est remboursé sur une durée d'utilisation relativement courte.

⁵¹ La capacité de cogénération est aujourd'hui de 4 GW

⁵² Outre la substitution du chauffage électrique et des économies d'électricité, le volontarisme consiste à développer l'éolien et la cogénération dans l'industrie et le tertiaire. Ces solutions sont en plein développement, les conditions sont favorables, les acteurs nombreux et motivés, et il ne devrait pas être trop difficile de prolonger les dispositifs de soutien.

⁵³ La différence d'investissement, entre l'option cogénération et l'option renouvellement du parc nucléaire, peut être estimée à 42 GW x 2,2 Euro/W = 90 milliards d'euros. Ce qui finance largement la suppression du chauffage électrique et les économies d'énergie.

Les mesures déjà prévues (PNAEE, PNLCC) devraient y suffire – même si les objectifs immédiats (engagements ADEME pour 2006) de l'ordre de 12 TWh pour les filières thermiques dont 99 % de biomasse, devront être sensiblement amplifiés. On a vu que le potentiel en énergie solaire est considérable : une réelle impulsion pourrait porter sa contribution d'ici moins de 20 ans entre 20 et 50 TWh. Le potentiel en bois énergie et biomasses est du même ordre de grandeur. Le potentiel supplémentaire des renouvelables « thermiques » peut ainsi être estimé entre 50 et 100 TWh d'ici 10 ou 20 ans.

On peut estimer que le potentiel d'économie sur le chauffage est du même ordre de grandeur. Sur 500 TWh consommés pour le chauffage des bâtiments, un gain de 10 à 20 % (50 à 100 TWh) sur 10 à 20 ans représente une progression de l'efficacité de 1 % par an.

◆ Cinq : les transports

Mais évidemment, le point crucial est celui de transports, sur lequel l'offre technologique ne peut avoir à court terme qu'un impact limité. Il s'agit plutôt ici de repenser l'urbanisation, les transports en commun, de réaménager la ville. Travail de longue haleine qui justifie l'urgence d'agir aujourd'hui pour espérer voir les effets d'ici quelques années.

- La consommation urbaine des véhicules particuliers représente ~110 TWh. Si 10 % de ce parc est converti à la propulsion électrique, le gain est de 7 TWh.
- La consommation interurbaine des véhicules particuliers représente ~160 TWh. En basculant 10 % du trafic vers le rail ou les transports en commun, le gain est de 11 TWh
- Si 10 % du trafic routier de marchandise bascule vers le rail, le gain serait de 23TWh.

Ces trois mesures représentent 40 TWh.

Récapitulons : 50 à 100 TWh de biomasse et solaire, 50 à 100 d'économies de chauffage, 40 dans les transports, soit 140 à 240 TWh d'énergies fossile substituées ou économisées. L'objectif est atteint : même en hypothèse basse, la consommation d'énergie fossile est diminuée.

5.5 APEP - un scénario soutenable

a) Première esquisse d'un scénario soutenable

Le tableau suivant résume un scénario possible, basé sur les principes énoncés précédemment. Il est construit en supposant qu'une part des besoins d'énergie soient couverts par la cogénération, selon les secteurs, et le solde par des applications thermiques directes (chaudières pour l'appoint) ou des applications « travail » directes (hydraulique, éolien, centrales thermiques pour couvrir le solde des besoins, moteurs pour véhicules...).

Ce « scénario » n'est pas un exercice de prospective : l'idée était de vérifier si le postulat selon lequel on pouvait à la fois se passer de l'uranium et diviser par deux la consommation de combustibles fossiles, était faisable dans l'état actuel des technologies. La réponse est positive.

Le scénario « APEP » pose en préalable une diminution de la demande en énergie utile de 20 % par rapport aux besoins actuels⁵⁴. Sans prôner un retour à une société pré-industrielle, on peut quand même s'interroger sur le futur où nous emmène le « développement » aussi « durable » soit-il : faut-il croître et dépenser, ou penser et décroître ? Cette diminution de 20 % n'est pas le retour au XIX^e siècle, ni même aux années 1970 : c'est le niveau de consommation de 1980...⁵⁵.

La répartition entre renouvelables et fossile est ventilée également selon les secteurs et les usages.

Scénario Autre Paysage Energétique Possible – APEP. En TWh.

TWh	Origine		Total	Usages		
	Fossiles	Renouvelables		Chaleur utile	Travail utile	Pertes
Consommation primaire						
cogénération	330	69	398			
chaleur utile	198	41		239		
travail utile	82	17			100	
pertes	49	10				60
chaleur	100	450	550			
chaleur utile	78	380		459		
pertes	22	70				91
travail	285	146	431			
travail utile	115	133			248	
pertes	170	13				184
Pertes raffineries, etc	12					
TOTAL	737	665	1 391	698	347	335

Les besoins en énergie utile sont estimés selon ce scénario à 1.045 TWh, dont 698 TWh de chaleur et 347 TWh de travail, plus 346 TWh perdus.

Ils sont couverts par :

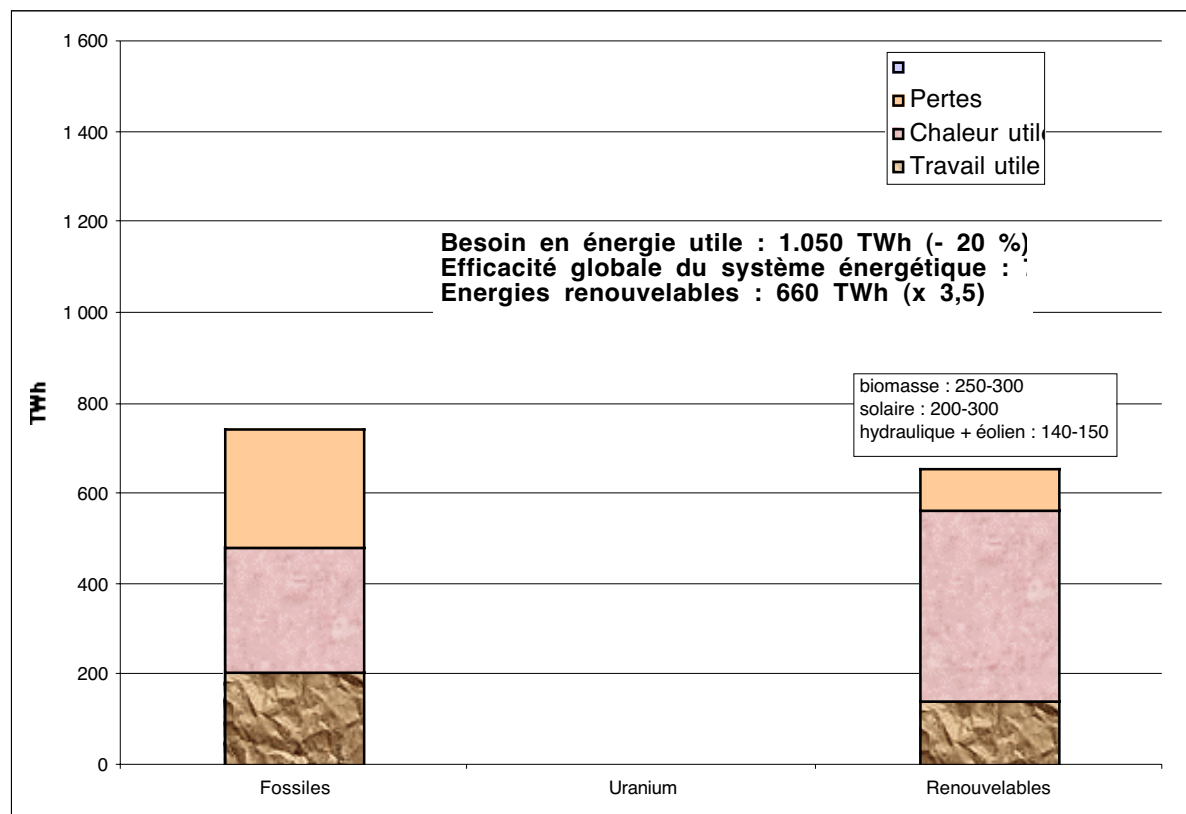
- Cogénération chaleur + travail : consommation primaire de 398 TWh, principalement à partir de combustibles fossiles (surtout industrie, ainsi que transports, et tertiaire), et un peu de renouvelables (industrie, tertiaire).
- Chaleur (sans production de travail) : chaudières et capteurs solaires (550 TWh : 450 TWh à partir du bois et du solaire, dont la moitié pour l'habitat, et 100 TWh à partir de combustibles fossiles, pour l'habitat, le tertiaire et l'industrie).
- Travail (sans production ou utilisation de chaleur) : consommation primaire de 431 TWh dont moteurs de véhicules (273 TWh de carburants fossiles, fournissant 109 TWh utiles, et un peu de biocarburants) ; quelques centrales thermiques (16 TWh, permettant de faire face aux pics de consommation) ; centrales hydrauliques ou éoliennes (production brute de 146 TWh).

⁵⁴ Les perspectives concluent invariablement à une augmentation prévisible des consommations. La réduction de 20 % est donc une hypothèse assez volontariste. On trouvera sur <http://manicore.com/documentation/sobriete.html> une approche intéressante des possibilités d'économies d'énergie, et des notions du type « à quoi avons-nous droit (comme quantités d'énergie consommée) ? ».

⁵⁵ En ces âges obscurs, où l'on s'éclairait à la bougie et se déplaçait en voiture à cheval, le nucléaire (en 1980) pesait pour 0,7 % dans la consommation finale d'énergie. Mais l'humanité survivait quand même.

Dans ce scénario, le secteur « transport » est assuré à 20 % (soit 27 TWh) par l'électricité produite par cogénération⁵⁶, et 80 % par des carburants (avec un rendement global de 40 % : moyenne entre un parc de moteurs thermiques classiques, à rendement amélioré, de véhicules hybrides, de piles à combustibles).

Scénario Autre Paysage Énergétique Possible – APEP. En TWh.



b) Un scénario à haute performance énergétique

Avec une consommation de 741 TWh de combustibles fossiles, il reste suffisamment de place aux véhicules propulsés par moteurs à explosion, ou à l'appoint thermique permettant d'éviter le défi d'immeubles 100 % solaire ou biomasse, pour que ce scénario ne suppose pas un total bouleversement.

Le rendement global de ce scénario est de 75 % : les trois quarts de l'énergie consommée sont transformés en énergie utile chaleur + travail.

La consommation des énergies fossile est réduite de 50 % - niveau bien supérieur à l'objectif Kyoto – **sans recours à l'énergie nucléaire.**

⁵⁶ il s'agit des transports en commun, qui utilisent déjà 10 TWh électriques, et des véhicules électriques : on voit que ce scénario ne repose pas sur la généralisation du véhicule électrique, puisque si l'on suppose un développement des transports en commun type train tram ou métro, la part des véhicules électriques ne dépasse guère 10 % du total du secteur des transports

c) Un scénario qui repose sur des technologies déjà opérationnelles

Ce scénario ne repose, notons le, sur **aucun saut technologique majeur**. Toutes les techniques envisagées sont connues et matures ⁵⁷.

D'autres scénarios de même type ont d'ailleurs déjà été élaborés par le passé, basés sur une même stratégie de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies renouvelables. Celui-ci en constitue le prolongement et l'actualisation.

Le principal obstacle à ce plan n'est pas non plus son coût économique⁵⁸: la réalité de l'existant – infrastructures, appareils et équipements – impose son rythme à l'évolution. On ne bascule pas si facilement un lotissement « tout électrique » des années 85 vers un réseau de chaleur urbain alimenté par cogénération bois. Le temps nécessaire aux évolutions majeures des grandes infrastructures est de l'ordre de la décennie : 20 ans, 30 ans, ou plus. Mais il faut rappeler qu'une centrale nucléaire, c'est 10 ans d'études et de travaux, 30 ans d'exploitation ou plus, un nombre d'années inconnu pour le démantèlement (plusieurs décennies) : bref une décision qui engage un demi siècle (sans parler des déchets). Tout comme la construction d'une maison, d'une ligne de chemin de fer, une autoroute ou un plan d'urbanisme.

On peut objecter que ce scénario ne permet pas de s'affranchir de la consommation des énergies fossiles. Mais aucune technologie aujourd'hui ne permet d'atteindre cet objectif à moyen terme : aucun scénario, de quelque bord qu'il provienne, ne parie sur la sortie d'un paysage énergétique dominé par les combustibles fossiles... Les partisans du tout nucléaire se gardent bien de chiffrer un programme de sortie des énergies fossiles : il faudrait en effet que le nucléaire soit capable d'assurer des consommations thermiques en pointe, ce qui nécessiterait probablement de multiplier par 10 le nombre de réacteurs nucléaires en France, et si l'on envisageait de substituer totalement le nucléaire aux énergies fossiles, il faudrait de l'ordre d'une dizaine de milliers de réacteurs nucléaires dans le Monde.

6. Et ensuite ?

a) Un guide récapitulatif

Ce qu'il faut **encourager en priorité** :

- La maîtrise des consommations dans tous les secteurs et tous les usages
- les réseaux de chaleur urbains et ruraux

⁵⁷ Ou le seront dans un avenir prévisible : notamment les piles à combustible dans les transports ou les véhicules hybrides. Mais ces techniques ne sont mise à contribution, dans ce scénario, que pour une part assez faible, donc même sans celles-ci le bilan global reste peu modifié. De même le principe de la pompe à chaleur n'est pas mis à contribution dans ce bilan.

⁵⁸ Il serait intéressant de développer l'argumentaire de la compétitivité de l'électricité française. Prenons un exemple d'un logement consommant 1 unité d'électricité spécifique et 2 unités de chaleur. La solution 1 consiste à utiliser de l'électricité pour produire la totalité de cette énergie avec un prix de 10 points par unité, ce qui donne $10 \times 3 = 30$ points. La solution 2 consiste à produire l'électricité spécifique avec un coût plus élevé (disons 13 points par unité) et la chaleur à partir d'un combustible (disons pour majorer 5 points par unité : en énergie finale, l'électricité coûte deux ou trois fois plus cher que la chaleur obtenue directement par un combustible), soit un coût total de $1 \times 13 + 2 \times 5 = 23$ points. Donc avec une électricité 30 % plus chère on a au final une facture 23 % plus faible. Le « faible coût » de l'électricité française doit donc encore une fois être replacé dans son contexte et la question ne peut être dissociée de celle des usages de l'électricité, notamment des usages thermiques. La conclusion est que l'on peut se permettre de produire une électricité plus chère (par exemple d'origine renouvelable) si par ailleurs celle-ci est réservée strictement à ses usages spécifiques.

- la cogénération dans l'industrie, et en chaufferies urbaines et tertiaires
- la cogénération biomasse sur réseau de chaleur ou dans l'industrie
- les centrales de cogénération mixtes biomasse (base) / fossile (appoint – secours)
- les transports en commun de type train électrique, métro, tramway
- les véhicules sobres, à pile à combustible, à moteur électrique, hybrides
- le solaire thermique dans l'habitat, le tertiaire, l'industrie
- toutes les énergies renouvelables : éolien, biomasse, solaire, géothermie...
- la cogénération à l'échelle individuelle ou en petit collectif (mico-turbines ou piles à combustible à gaz)

Ce qu'il faut supprimer en priorité :

- toutes les applications thermiques de l'électricité : chauffage, eau chaude sanitaire, eau chaude non sanitaire (lave-vaisselle, etc)
- les exportations d'électricité
- le nucléaire
- l'usage individuel de la voiture à moteur thermique pour les déplacements de proximité
- les usages purement électriques des combustibles
- les usages purement thermiques des combustibles lorsque ceux-ci se prêtent à la cogénération (gaz, fioul, charbon, biomasse dans les centrales les plus importantes), surtout dans l'industrie et les réseaux de chaleur

b) Les questions qui restent à préciser

Ce rapide survol d'un « autre paysage énergétique » demande à être détaillé : secteur par secteur, en fonction du type d'habitat, de la région, de la saison, etc.

Il nécessite aussi une évaluation économique. Toutes les mesures proposées ne sont pas nécessairement coûteuses, bon nombre se font à coût marginal, nul ou négatif. Par exemple : le transfert d'applications électriques vers du thermique, ou le recours aux appareils économes se fait sans surcoût...

D'une manière générale, économiser l'énergie est censé coûter moins cher que la produire (au moins jusqu'à un certain point). On peut mettre en balance l'économie de 750 TWh de combustibles fossiles et de 272 TWh d'électricité nucléaire (dans notre scénario par rapport au bilan actuel), avec le coût que représente une production supplémentaire de 400 TWh d'énergie biomasse et solaire, plus 60 TWh d'électricité éolienne et hydraulique.

c) Des indicateurs à mettre en place

Il serait intéressant de mettre en place des **indicateurs** statistiques pertinents du point de vue de l'analyse proposée ici, en particulier de suivre, année par année et secteur par secteur : les évolutions de la consommation **d'énergie utile**, du **rendement énergétique global** et du **rapport W/Q**.

Le rendement global s'est-il amélioré ou dégradé ces trente dernières années en France ? On serait tenté de le croire, dans la mesure où les postes à « grosses déperditions » - nucléaire et transport automobile – ont augmenté de façon spectaculaire... Qu'en est-il de l'énergie utile ? La politique énergétique française a-t-elle été pertinente de ce point de vue, si oui dans quelle mesure, quels secteurs ?

d) En conclusion

Alors peut-on ou ne peut-on pas se passer du nucléaire ? Les renouvelables peuvent-elles s'y substituer ? Poser ainsi le débat, c'est déjà y répondre. C'est bien ainsi que sont présentés les termes du débat énergétique. Sortir du faux dilemme est un impératif, mais invoquer les grands principes ne suffit pas à convaincre.

Cet exercice de quantification, qui évidemment comporte nombre d'imprécisions et de simplifications que l'on jugera optimistes, pessimistes, idéalistes, arbitraires, fatalistes, selon le point de vue que l'on voudra défendre, suscitera nous l'espérons des réactions que nous serons heureux d'intégrer à notre réflexion.

7. Annexes

7.1 Bibliographie

Publications du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, Direction Générale de L'Energie et des Matières Premières (DGEMP), Observatoire de l'Energie :

- Les Chiffres Clé : L'énergie , Edition 1999/2000. Avril 2000
- Les Bilans de l'Energie, 1970-1988
- Tableaux des consommations d'énergie en France, Edition 1999
- Energies Renouvelables en France, 1970-2000. Septembre 2001
- L'énergie en France – Repères. Editions 2000 et 2001
- Statistiques énergétiques en France. Mai 2002

Voir : <http://www.industrie.gouv.fr/energie>

7.2 Electricité

◆ Electricité « spécifique » et usages thermiques

Laves-linge, laves-vaisselle, sèches-linge, totalisent (pour le secteur résidentiel) 10 TWh (en 1997) qui sont en majeure partie des besoins de chaleur basse température - moins de 100 °C-, qui peuvent être couverts par d'autres formes d'énergie.

Même le froid peut être assuré à partir de chaleur (voir par exemple les réfrigérateurs au butane utilisés en camping).

Parmi les usages dits « spécifiques » de l'électricité, ceux qui en réalité couvrent des besoins thermiques (chauds ou froids) représentent environ 30 TWh, soit la moitié des usages dits spécifiques de l'électricité dans le secteur résidentiel.

◆ Clé de répartition sources / usages : le lien nucléaire / chauffage et l'usage « en base » de l'hydraulique

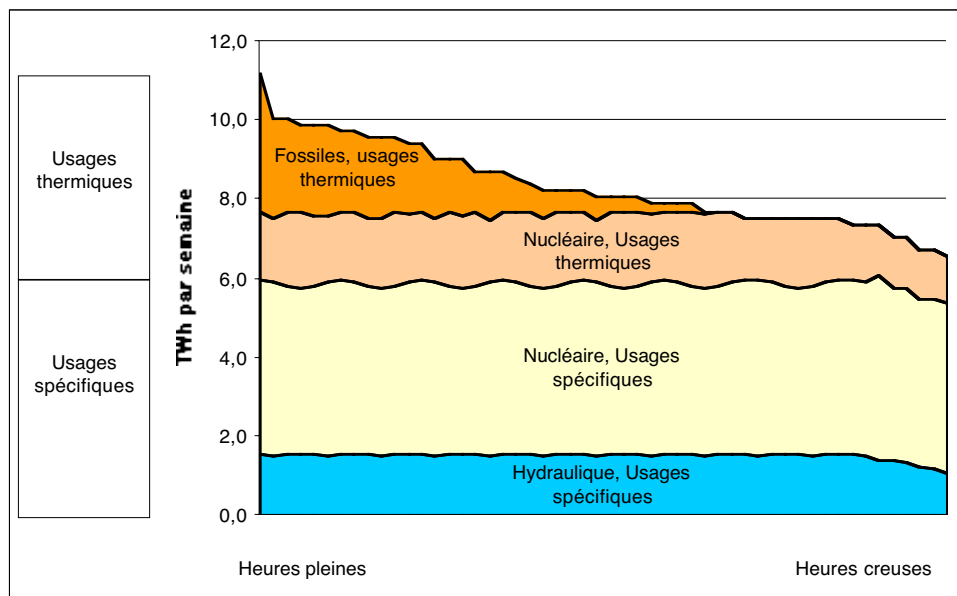
Le chauffage électrique est interdit dans certains pays, qui considèrent l'électricité comme un bien trop précieux pour la gaspiller dans un usage qui représente la forme d'énergie la plus dégradée d'énergie : le maintien de locaux à 20°C. En outre, les usages spécifiques de l'électricité impliquent une fourniture de très haute qualité, pour éviter les variations de tension, fréquence, sans parler des microcoupures, des harmoniques, etc, risquant d'endommager les appareils utilisateurs (EDF s'engage d'ailleurs auprès des industriels sur la qualité de l'électricité fournie). Ce n'est pas le cas avec de simples résistances électriques à effet Joule. Le réseau électrique fournit donc de l'énergie « haute qualité » y compris pour des applications qui n'en demandent pas tant : un peu comme le fait de distribuer de l'eau potable pour arroser le jardin. En outre, le réseau électrique pourrait, demain, véhiculer non seulement de l'énergie, mais aussi de l'information. Le réseau doit supporter à la fois une haute qualité et des appels de puissances variables.

Enfin, la force hydraulique est déjà une forme de travail : la logique de la thermodynamique conduit à la réserver à des applications analogues, plutôt qu'à la dégrader en chaleur.

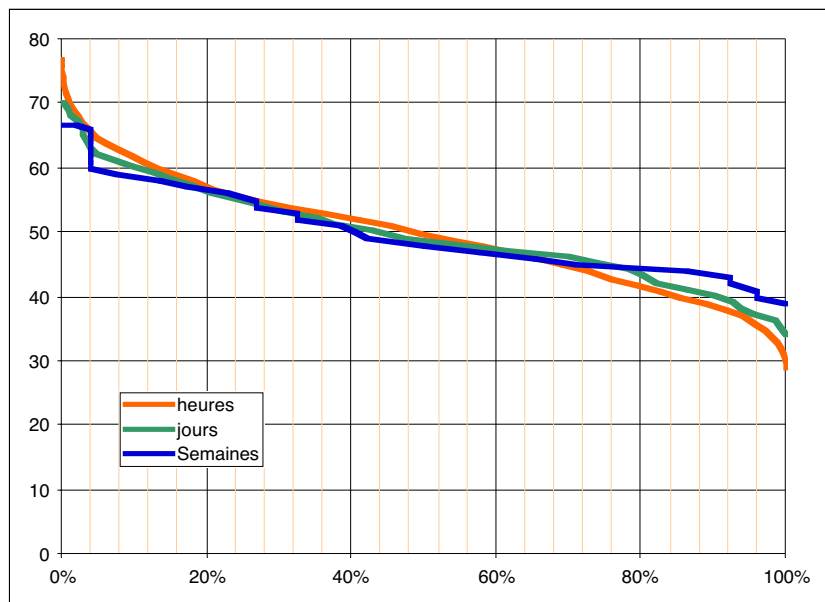
◆ Courbe monotone de consommation : un lien entre usages de l'électricité et moyens de production, donc sources d'énergie

Schéma simplifié de la « courbe monotone de consommation » : en ordonnées, la puissance appelée et en abscisse, le nombre d'heures sur l'année. Les surfaces sont proportionnelles aux consommations. On distingue différents régimes : base, semi-base, pointe, correspondant à des usages et des moyens de production différents. On notera au passage que l'argument invoqué au sujet de l'éolien, sur la nécessité de recourir à des centrales thermiques pour lisser une production variable, s'applique aujourd'hui au nucléaire, puisque celui-ci est économiquement tout à fait incapable de fournir de l'électricité en pointe ou en semi-base.

La courbe monotone est construite à partir des publications de RTE⁵⁹. Les consommations sont déduites des appels de puissance (données demi-heuraires) sur l'année 2001. La répartition (par sources et par usages) est réalisée sur la base des clés de répartition indiquées, elle est approximative mais donne une bonne idée de la structure générale de la consommation.



Le graphique suivant indique l'appel de puissance (en Gigawatt) par heure, par jour et par semaine, toujours à partir des statistiques de RTE. La puissance minimale/maximale appelée est de 29 / 77 GW en moyenne horaire, 34 / 70 GW en moyenne journalière, et 39 / 67 GW en moyenne hebdomadaire (en abscisse, le pourcentage en nombre d'heures, de jours et de semaines respectivement).



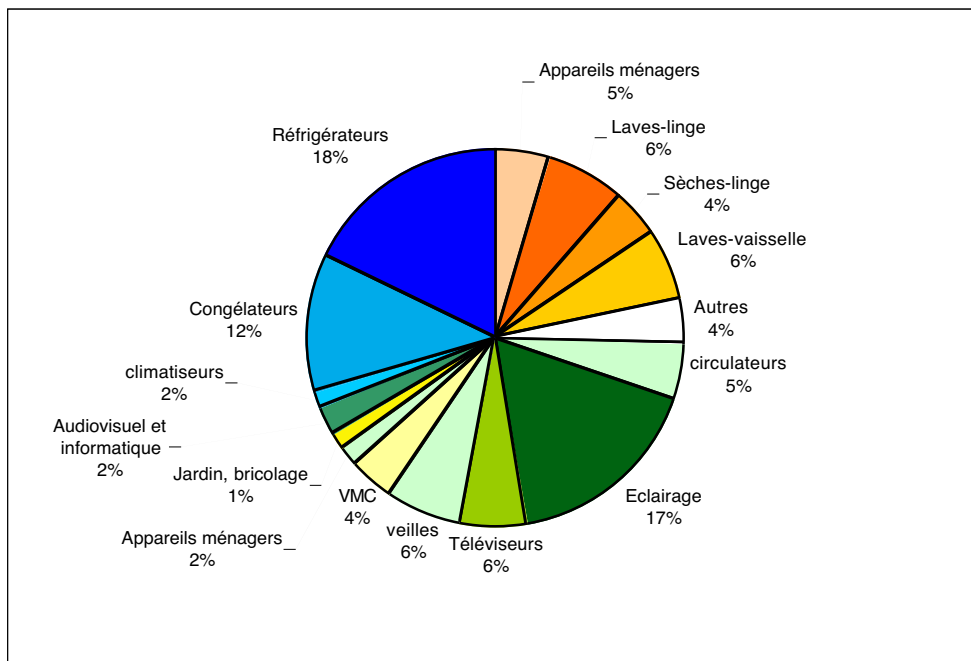
⁵⁹ source : www.rte-france.com

7.3 La maîtrise de la demande d'électricité

Le graphique suivant indique la répartition de 62 TWh d'électricité consommées dans le secteur résidentiel, en 1997. Les principaux postes sont issus des « tableaux des consommation d'énergie », les autres sont des estimations.

On peut réunir ces consommations en trois groupes :

- Les usages thermiques (laves-linge, sèches-linge, laves-vaisselle...) : environ 20 %
- Les usages « froid » (réfrigérateurs, congélateurs, et un peu climatisation) : environ 30 %
- Les autres usages (éclairage, téléviseurs, audiovisuel, circulateurs de chauffage central, ventilation mécanique, veilles, robots ménagers...), qui seuls peuvent être qualifiés de spécifiques : environ 50 %



Il existe donc un important potentiel d'économies (éclairage et électroménager) ou de transfert des applications électricité vers des applications thermiques directes, pour les usages « chaud » mais aussi (au moins en partie) pour les usages « froid ».

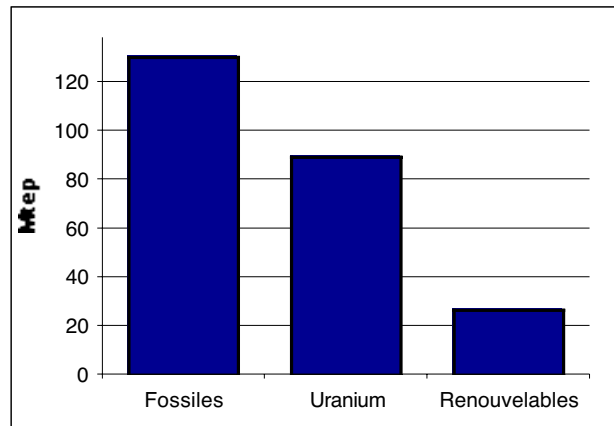
Dans le tertiaire (67 TWh), les principaux postes sont l'éclairage (28 TWh) et la climatisation (5 TWh). L'industrie enfin consomme 125 TWh, dont 45 TWh pour les moteurs. La variation de vitesse représente un gisement technique de 7 TWh d'économies⁶⁰, dont la moitié accessible dans les conditions économiques actuelles. Au total, le gisement de MDE peut être estimé entre 70 à 100 TWh, dont 20 à 30 TWh par substitution d'énergie thermique à l'énergie électrique.

⁶⁰ Source : revue Energie Plus, Mai 2002. Voir aussi <http://www.energy-plus.org> sur l'électroménager économe et le site du centre d'énergétique de l'Ecole des Mines, <http://www-cenerg.ensmp.fr/francais/themes/mde/html/mde.htm>, où l'on trouvera aussi les « chiffres clé de la climatisation ».

7.4 Comptabilité énergétique et représentations

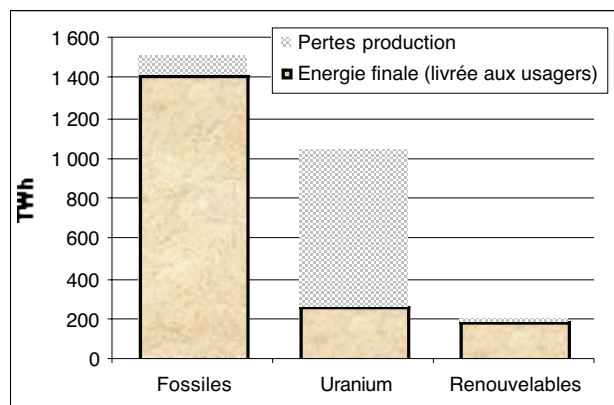
a) La représentation selon la comptabilité officielle

Selon le mode de comptabilité énergétique adopté officiellement en France, l'uranium représente 32 % de l'énergie totale consommée.



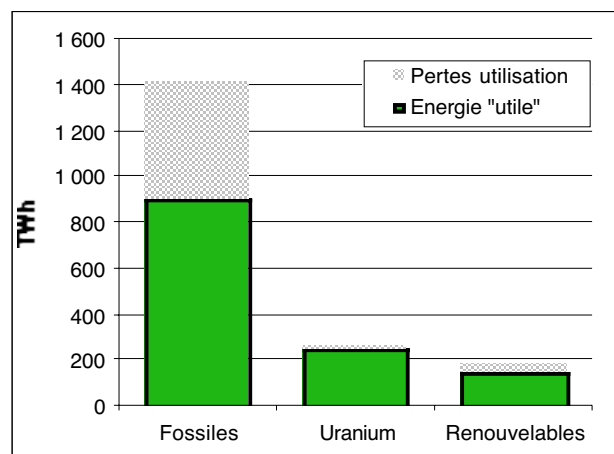
b) Energie « livrée »

Si on raisonne « énergie livrée aux usagers », donc hors pertes à la production (chaleur perdue des centrales nucléaires et thermiques, autoconsommation d'électricité, pertes réseau, consommation des raffineries...), cette contribution n'est plus que de 15 %⁶¹.



c) Energie « utile »

Enfin, en raisonnant « énergie utile », c'est-à-dire en déduisant les pertes à l'utilisation (rendement des chaudières, et surtout moteurs de véhicules...), elle s'élève à 20 %.



Ces différentes représentations sont également justes, mais elles ne sont pas neutres.

⁶¹ L'Agence Internationale de l'Energie utilise une comptabilité selon le premier type pour la production d'énergie (1 tep = 11.620 kWh de combustible x 33 % = 3.840 kWh électriques), mais du second type pour la consommation finale (1 tep = 11620 kWh, qu'il s'agisse d'électricité ou de combustible).

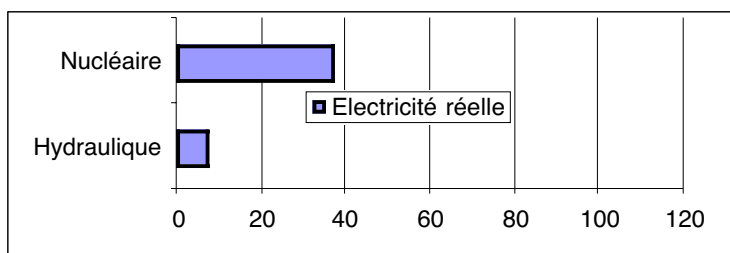
d) La nouvelle comptabilité adoptée en 2002

En 2002, le Conseil d'Orientation de l'Observatoire de l'Energie a adopté une nouvelle méthode de comptabilité inspirée de celle de l'Agence Internationale de l'Energie et d'Eurostat. La principale modification porte sur l'électricité : l'électricité nucléaire est comptabilisée selon la méthode de l'équivalent primaire à la production avec un rendement théorique de 33 %. Soit $0,086 / 0,33 = 0,2606$ tep/MWh. Les autres formes d'électricité sont comptabilisées selon la méthode du contenu énergétique, soit 0,086 tep/MWh.

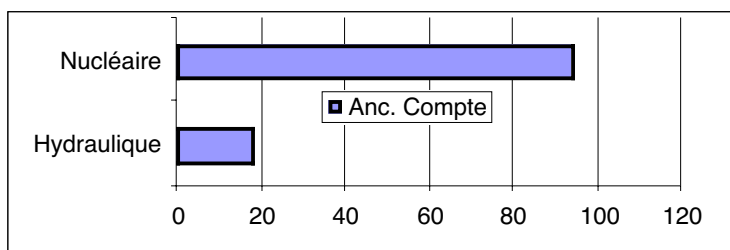
La méthode précédente était basée sur la méthode de l'équivalent primaire avec un rendement de 39 %, soit 4.500 kWh électriques par tep (ou 0,222 tep/MWh électrique) quelle que soit la source.

MWh primaire / tep	Rendement	MWh électrique / tep	tep / MWh électrique
11,628	0,330	3,837	0,2606
11,628	0,387	4,500	0,2222
11,628	1,000	11,628	0,0860

Le graphique suivant indique la production d'électricité nucléaire et hydraulique : 5,3 fois plus de nucléaire (422 TWh) que d'hydraulique (79 TWh) en 2001, soit un total de 43 Mtep en équivalence à la consommation.



Avec l'ancien compte, la proportion est identique, mais l'ensemble pèse pour 111 Mtep, dont, rappelons-le, $111 - 34 = 68$ Mtep de chaleur perdue des centrales... ce qui au passage revient à comptabiliser sur les centrales hydrauliques des pertes thermiques qui n'existent pas !...



Avec le nouveau mode de comptabilité, cette dernière absurdité est supprimée... ce qui revient à réduire considérablement la part de l'hydraulique : elle passe de 17,6 à 6,8 Mtep.

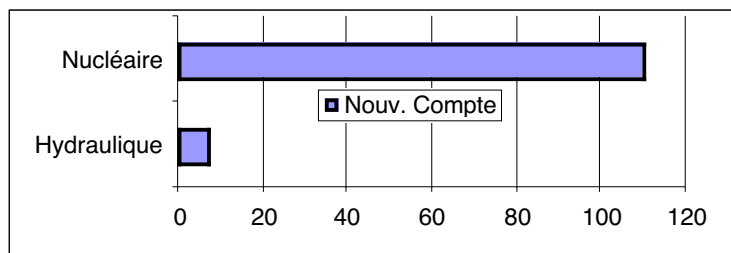
Comme en outre le rendement des centrales nucléaire est révisé à la baisse (33 % contre 39 %), la consommation d'énergie primaire augmente d'autant : le nucléaire passe ainsi, pour

une même production de 422 TWh, à 110 Mtep au lieu de 94 Mtep selon le mode de comptabilité antérieur.

Ce qui revient à dire que plus le rendement des centrales nucléaires est bas, plus sa participation au bilan d'énergie primaire est élevé...

Ainsi, sans faire varier le bilan d'un seul kWh électrique, l'hydraulique perd 11 Mtep tandis que le nucléaire en gagne 16...

Avec ce nouveau mode de comptabilité, le rapport nucléaire sur hydraulique, de 5,3 en termes de production d'électricité, passe à 16,1 en termes de production primaire...



Cette nouvelle comptabilité modifie considérablement le bilan d'énergie finale, puisqu'à ce stade l'électricité est comptabilisée selon la méthode du contenu énergétique. Alors que les bilans précédents indiquaient une consommation finale d'électricité de 88 Mtep en 2000 – soit 41 % de la consommation finale énergétique selon le bilan officiel - , elle n'est plus que 34 Mtep pour la même année 2000 selon le nouveau mode de comptabilité, soit 22 % de la consommation finale énergétique !

Le tableau « production nationale d'énergie primaire » indique une contribution du nucléaire pour l'année 2000, de 108 Mtep, contre $6,2+11,8 = 18$ Mtep pour les renouvelables (hydraulique et renouvelables dites « thermiques »). Le ratio nucléaire / renouvelables est de 6.

Le tableau « consommation finale énergétique » ne permet pas de distinguer la part du nucléaire, seul le poste « électricité » est indiqué : 34 Mtep. On a vu plus haut que la part du nucléaire, en utilisant les clés de répartition indiquées (autoconsommations, pertes, exportations) était de 70 % de la consommation finale d'électricité, soit 24 Mtep : soit 15 % des 158 Mtep de consommation finale énergétique.

Chiffre que l'on peut aussi comparer à la consommation finale issue de l'hydraulique – près de 6 Mtep – et aux renouvelables thermiques – 11,2 Mtep d'énergie finale – soit près de 17 Mtep. Le ratio nucléaire / renouvelables n'est plus que de 1,4.

7.5 Thermodynamique : rappel de cours

a) Les principes de la thermodynamique

Le premier principe de la thermodynamique dit que toute variation de l'énergie interne se transforme en chaleur et en travail : $\Delta U = W + Q$. C'est le principe de la conservation de l'énergie. Le second principe de la thermodynamique dit que l'entropie d'un système croît lors de toute transformation. C'est le principe dit « d'évolution » de l'énergie : tout « retour en arrière » est interdit (c'est le sens étymologique du mot), et si l'on peut convertir le travail en chaleur en totalité, la réciproque est impossible.

C'est pourquoi l'on dit que la chaleur est une forme dégradée de l'énergie, tandis que le travail (ainsi que d'autres formes, comme l'électromagnétisme) sont des formes nobles de l'énergie. Le principe de Carnot est une application du premier principe de la thermodynamique, de même que le principe inverse de la thermopompe (pompe à chaleur, réfrigérateur). Selon ce principe, le rendement maximal – ou plus exactement le facteur de conversion - d'un moteur fonctionnant entre une source froide à la température absolue T_1 et une source chaude à la température T_2 est égal à $1 - T_1/T_2$.

Le rendement des machines réelles est plus faible que le « rendement » (théorique) de Carnot, car elles sont limitées par des contraintes techniques (pression, température, surfaces d'échange...).

b) L'exergie et les formes d'énergie

Il existe différentes notions pour décrire l'énergie : énergie interne, enthalpie, entropie, exergie... La notion d'exergie tient compte de la quantité de travail – l'énergie « noble » - potentiellement contenue dans une forme d'énergie. Les fumées d'une chaudière gaz s'élèvent à plusieurs centaines de degrés, son contenu exergétique est élevé. De l'eau chaude à 40 °C ne contient pratiquement pas d'exergie (c'est une forme « dégradée » de l'énergie, comme l'air à 20 °C des logements), puisque sa température est proche de la température ambiante, et que le rendement exergétique dépend de l'écart entre la température source et de la température ambiante⁶².

En passant directement de la première à la seconde forme, on perd de l'exergie – ce qui est aussi « grave » que de ne pas utiliser la chaleur perdue des centrales thermiques...

⁶² Ces notions d'énergie « noble », « dégradée », ne sont pas des concepts scientifiques mais des notions pratiques. En fait, une énergie est plus « noble » qu'une autre dans la mesure où elle se prête plus facilement à un plus grand nombre d'usages. Cette faculté est liée principalement à la température : avec un fluide à 500 °C, on peut fournir de l'énergie mécanique, faire la cuisine, de la vapeur, produire de l'eau chaude sanitaire, chauffer des logements... Avec un fluide à 60 °C, on est limité aux deux dernières applications. Si on ne dispose que d'une source à 30 °C, on ne peut guère s'en servir que pour le chauffage. Si on a l'usage d'une énergie à 30 °C, pas de problème, mais si on a besoin d'énergie à plus haute température, toute source à température inférieure est inutilisable – sauf à « pomper » la chaleur de la source froide vers la source chaude.

Imaginons que l'on assimile le système énergétique français à une seule méga-machine thermodynamique fournissant la totalité de l'énergie nécessaire. Celle-ci devrait produire un tiers de travail et deux tiers de chaleur : dans l'idéal (c'est-à-dire une parfaite adéquation entre production et usages), on peut fournir cette énergie en ne consommant que la moitié de la consommation actuelle, sans pertes, puisque ces proportions correspondent à un rendement réel.

Tout écart par rapport à cet idéal engendre nécessairement une consommation supplémentaire d'énergie. Imaginons en effet l'inverse (aucun mal, puisque c'est la situation actuelle) : comme l'on n'utilise pas le contenu « exergétique » des combustibles, il faut produire du travail sans récupération de chaleur.

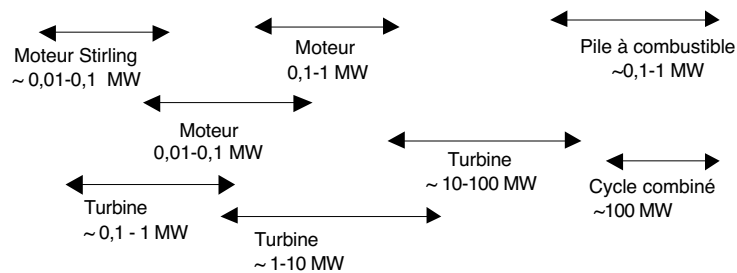
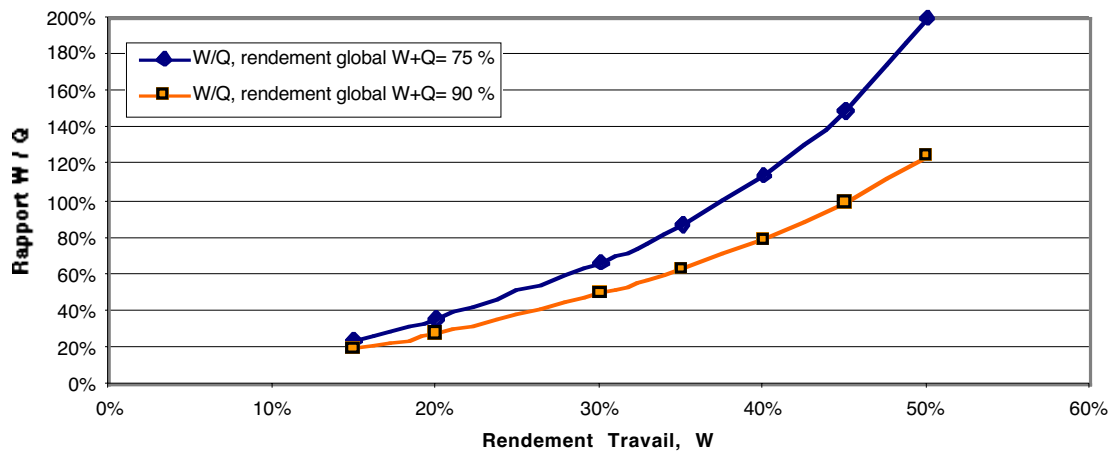
Tout kWh produit par une chaudière sans fourniture de travail au passage, engendre un **gaspillage exergétique**, puisqu'il faudra alors fournir cette exergie au moyen de machines dont on ne récupère pas la chaleur. Seules les centrales qui utilisent un flux, comme l'hydraulique ou l'éolien, échappent à cette nécessité, puisqu'elles se contentent de convertir de l'exergie sauvage en exergie domestique.

7.6 Cogénération : problèmes et opportunités

a) Quelques précisions sur le ratio « travail / chaleur »

Le rapport « travail / chaleur » (ou W/Q) entre travail utile et chaleur utile dépend des secteurs, et est affecté d'importantes variations saisonnières. Il conditionne le rendement global du système permettant de couvrir au mieux l'ensemble des besoins d'énergie utile. Plus ce rapport est faible, plus il est techniquement aisé de fournir travail et chaleur avec un rendement global élevé.

Si l'on recherche W et W/Q élevés, le rapport W/Q atteint 120 % avec les piles à combustibles, seule technologie adaptée à des gammes de petite puissance aujourd'hui. Les technologies adaptées aux moyennes puissances (< 10 MW) ne permettent guère de dépasser un ratio W/Q de 70 %.



Le tableau ci-dessous indique – en ordre de grandeur - ce rapport W/Q , à partir des besoins d'énergie utile Q et W , pour chaque secteur et les deux « saisons » hiver et été.

Répartition des consommations chaleur – travail, en TWh (à partir des chiffres 1997)

	« Hiver » 5 mois	« Été » 7 mois	TOTAL
INDUSTRIE - AGRICULTURE			
Q	196	117	313
W	59	69	128
W/Q	30%	59%	41%
RESIDENTIEL			
Q	350	56	406
W	29	34	62
W/Q	8%	61%	15%
TERTIAIRE			
Q	133	21	154
W	31	37	67
W/Q	23%	174%	44%
TRANSPORTS			
W	81	96	176
TOTAL			
Q	678	194	872
W	199	235	434
W/Q	29%	121%	50%

Le ratio W/Q ne dépasse cette limite de 120 %, que dans le secteur tertiaire en « été » ⁶³.

b) Saisonnalité

Plus de la moitié de la chaleur (438 TWh sur 832) correspond à des besoins de chauffage, fortement saisonnalisés, et concentrés sur quelques mois de l'année, ce qui interdit un raisonnement trop global. Une notion importante est le rapport W/Q, soit travail / chaleur (cf. ci-dessus).

On peut tirer de l'analyse détaillée (par saison et par secteur) différentes priorités :

- La première priorité est de limiter les besoins en travail (électricité),
- La seconde priorité est de limiter les besoins saisonniers en chaleur, c'est-à-dire le chauffage des locaux, pour diminuer le ratio W/Q en pointe hivernale
- La diminution des besoins thermiques réguliers (eau chaude) n'est pas une priorité. Il est d'ailleurs plus difficile d'intervenir sur ces usages que sur l'isolation ou la conception des bâtiments. Tout transfert d'usage thermique de l'électricité (eau chaude sanitaire et non sanitaire : machines à laver...) vers une demande de chaleur directe améliore le rapport W/Q.
- La cogénération peut être aisément développée dans l'industrie, secteur qui techniquement s'y prête bien, et offre une bonne adéquation entre besoins en chaleur et travail, avec d'assez faibles contraintes saisonnières.

⁶³ Les ratio de 60 à 80 % peuvent être obtenus avec des technologies matures pour toutes gammes de puissance, par exemple de type moteur (rendement électrique de 30 à 35 %, rendement thermique de 40 à 50 %, rendement global de 80 %). Un ratio de 100 % signifie que le système devrait fournir autant d'électricité que de chaleur tout en maintenant un rendement global élevé. Soit dans l'idéal un rendement électrique de l'ordre de 40 à 45 % et un rendement thermique identique. Ces rendements ne peuvent être atteints qu'avec des piles à combustible (petites puissances) ou des centrales à cycle combiné gaz-vapeur : dans ce dernier cas, il s'agit de fortes puissances, et la nécessité de valoriser la chaleur implique l'implantation de ces centrales aux abords immédiats des métropoles.

- En raisonnement global, il est théoriquement possible de couvrir l'ensemble des besoins par cogénération avec un rendement global bien supérieur au rendement actuel, malgré les déperditions dues à la saisonnalité des besoins thermiques

c) Stockage

On ne sait pas aujourd'hui stocker convenablement l'énergie pour réduire les contraintes liées à la saisonnalité. Plusieurs voies sont à explorer, notamment les suivantes.

- La suppression des applications thermiques de l'électricité réduit fortement les pics de consommation hivernaux, libérant d'autant les capacités de production des centrales hydrauliques de pompage destinées actuellement à couvrir ces pointes. Ces capacités peuvent dès lors être employées pour lisser les variations de production des sources renouvelables (centrales hydrauliques et éoliennes). Les prévisions météorologiques permettent aujourd'hui de prévoir avec quelques jours d'avance la production d'électricité éolienne, ce qui permet de délester certains équipements en heures de pointe (pic de consommation, creux de production).
- Les batteries des véhicules électriques offrent une capacité de stockage de l'électricité. Leur recharge, en heures creuses, se substituerait au stockage représenté aujourd'hui par les cumulus électriques.
- Les réseaux de chaleur permettent de tirer parti du « foisonnement » (lissage du pic de consommation de chaleur par répartition entre plusieurs logements), de la même façon que le foisonnement permet de aujourd'hui de lisser le pic d'appel de l'électricité.

7.7 Le véhicule électrique

Le rendement théorique d'un moteur électrique avoisine les 100 %, 3 fois plus qu'un moteur thermique⁶⁴. Ce rendement doit être pondéré à la baisse par les pertes à la production et à la distribution (ce qui n'est pas un problème si l'électricité est produite localement par cogénération), par le facteur de charge des batteries (de l'ordre de 65 %), et par le poids des batteries. Il doit inversement être pondéré à la hausse, grâce aux économies permises par le fonctionnement instantané (pas de marche à vide du moteur électrique), la possibilité de récupérer l'énergie de freinage (recharge des batteries), la faible sensibilité à la température (démarrage à froid des moteurs thermiques).

En intégrant l'ensemble de ces éléments, on retrouve le facteur 3 théorique entre véhicule électrique et véhicule thermique. Un « plein » d'un véhicule électrique (type Clio) est de 20 kWh électriques pour 100 km, à comparer aux 6 litres au 100 km du modèle thermique équivalent, soit 60 kWh⁶⁵.

La question n'est pas tellement celle de la fourniture de cette électricité : celle-ci peut être produite par cogénération (on le verra dans la suite de l'article) avec un rendement global optimisé. Les problèmes sont plutôt d'ordre technique : stockage (batteries), usage (autonomie limitée), approvisionnement (bornes publiques, domestiques)...

Il existe de nombreuses variantes du véhicule électrique, par exemple⁶⁶ :

- véhicule purement électrique fonctionnant sur batteries rechargeables sur le réseau avec une autonomie limitée à près de 100 km. Les nouvelles batteries (lithium-polymères, démarrage de fabrication prévue en 2004 par une filiale EDF et groupe Bolloré, ou lithium-ion de SAFT) devraient permettre d'augmenter cette autonomie à 250 km.
- véhicule hybride doté d'un moteur thermique (ou d'une pile à combustible) pour la route et moteur électrique en régime urbain. Le gain est intéressant surtout si la batterie est rechargée sur le réseau par cogénération et non par le moteur thermique.
- Véhicule semi-hybride avec une assistance électrique au démarrage (par exemple projets mini-hybrid et mild-hybrid de PSA) et récupération de l'énergie de freinage (projet mild-hybrid) permettant des gains de carburant modestes de 10 à 15 %.
- véhicule électrique sur batteries avec un moteur thermique qui prend le relais sur route en rechargeant la batterie (« prolongateur d'autonomie ») : modèle Kangoo Electro-road de Renault Nissan dont la sortie est prévue pour Juillet 2002, doté d'un petit moteur et d'un réservoir de 10 litres, ce qui devrait permettre de porter l'autonomie totale à plus de 250 km.

⁶⁴ La source la plus intéressante est le site canadien <http://www.evac.ca>. On peut aussi se référer à <http://www.avere-france.org>, plus commercial et moins riche, et à <http://w3.unige.ch/sebes/textes/1995/95PLautoelec.htm> qui conteste l'intérêt énergétique des véhicules électriques, avec justesse lorsque l'électricité est produite par des centrales thermiques, mais sous-évalue manifestement le différentiel de rendement global entre véhicule électrique et véhicule thermique.

⁶⁵ Il faut cependant compter un appoint thermique pour le chauffage des véhicules en hiver.

⁶⁶ Voir l'article du Monde daté 14 juin 2002, « le moteur hybride relance la voiture électrique ».

7.8 La pompe à chaleur et le chauffage « géosolaire »

◆ Principe du chauffage « géosolaire »

Le chauffage dit « géothermique basse température » fait l'objet aujourd'hui d'une campagne très offensive de promotion. En réalité, les techniques proposées sont des pompes à chaleur (PAC⁶⁷) utilisant le sol comme source froide. Le principe de la PAC consiste à fournir de l'énergie mécanique (électricité) pour « pomper » les calories d'une source froide (air, eau, sol) vers une source chaude (les radiateurs ou le plancher chauffant de la maison). C'est le principe du réfrigérateur, mais fonctionnant « à l'envers » – lui-même étant le principe inversé du principe de Carnot.

Grâce à ce système, on consomme en théorie 1 kWh électrique pour fournir 3 kWh de chaleur. On parle d'un COP (coefficient de performance) de 3. Par rapport aux antiques PAC air-air, échec retentissant des années 1980, les systèmes aujourd'hui promus sont certes beaucoup plus performants, puisque le COP est plus proche de 4 que de 2 : en effet, le COP est directement proportionnel à la température de la source froide : le sol (ou l'eau du puits) est plus chaud que l'air en hiver, donc le COP des PAC sol ou eau est supérieur à celui des PAC air.

Le chauffage pseudo géothermique est donc un système PAC, plus performant que les précédents dans la mesure où il utilise le sol comme source froide. Le fait que la température du sol soit constante ne provient pas de la chaleur interne de la Terre (comme dans le cas de la « vraie » géothermie), mais dans la très forte inertie du sol qui lui permet de garder une température constante toute l'année. En fait, le sol emmagasine l'énergie solaire reçue en été et la restitue en hiver. La revue « Systèmes Solaires » préfère à juste titre le terme de géosolaire⁶⁸.

Il s'agit donc d'une forme très particulière d'énergie renouvelable : le chauffage solaire ne consomme de l'électricité que pour faire circuler l'eau chaude depuis les capteurs solaires, la consommation d'électricité est de l'ordre du pourcent par rapport à l'énergie captée, contre quelques dizaines de pourcents pour les systèmes thermodynamiques. L'appellation de « chauffage géothermique » est une appellation marketing destinée à faire bénéficier ce système de la bonne image de marque des énergies renouvelables et à la démarquer du passif des anciennes PAC.

◆ Bilan énergétique global et émissions de gaz à effet de serre

Cependant, le bilan énergétique global doit tenir compte :

- Du rendement du système électrique : 30 %
- De la part des combustibles fossiles dans la fourniture de l'électricité utilisée pour des usages thermiques en hiver : elle est sans doute supérieure à 50 %
- De la nécessité d'un appoint en cas de grand froid, pour limiter l'investissement de la pompe à chaleur. Actuellement, il semble que le dimensionnement conseillé soit de 80 % de taux de couverture par la PAC et de 20 % par l'appoint (convecteurs électriques classiques).

⁶⁷ à ne pas confondre avec la Pile à Combustible !

⁶⁸ voir le dossier sur la question, n°148 Mars Avril 2002).

Ainsi, pour fournir 100 kWh d'énergie pour le chauffage, on va en consommer 20 à partir des convecteurs et 80 à partir de la PAC. Soit une consommation de $20 + 80 / 4 = 40$ kWh électriques. Compte tenu du rendement global du système électrique, la consommation totale d'énergie primaire (« combustible ») sera égale à $40 / 0,3 = 133$ kWh d'énergie primaire.

Le système consomme donc 133 kWh d'énergie primaire dont la moitié d'uranium (67 kWh), un quart de charbon (34 kWh), et le reste à partir de fioul et de gaz naturel (34 kWh).

Bien entendu, ce système est beaucoup plus performant que le chauffage électrique par convecteurs : dans ce cas, la consommation totale d'énergie est de 330 kWh, dont la moitié d'uranium, 85 kWh de charbon et 85 kWh de fioul et gaz. Globalement, le chauffage géosolaire permet de diviser par 2,5 la consommation d'uranium et d'énergie fossile, et les émissions de gaz à effet de serre, par rapport au chauffage électrique direct.

Cependant, le gain par rapport à un chauffage central classique est faible, voire nul. Avec une chaudière à gaz à haut rendement (95%), la consommation d'énergie primaire est de 105 kWh, soit une économie en faveur du gaz de 20 %. La consommation d'énergie fossile est certes supérieure, mais comme le charbon émet deux fois plus de gaz carbonique que le gaz naturel, au final les émissions de gaz à effet de serre sont identiques.

Au final, le chauffage géosolaire n'économise guère d'émissions de gaz à effet de serre par rapport à un chauffage central classique, tout en consommant de l'électricité nucléaire.

◆ La pompe à chaleur, une solution d'avenir

Cependant, ceci ne condamne pas la PAC. En effet, tout serait différent si l'électricité était fournie par cogénération. Dans ce cas, le rendement du système énergétique ne serait pas de 30 %, mais plus proche de 90 %.

La problématique est similaire à celle du véhicule électrique : c'est moins le principe lui-même qui est en cause, que le contexte. Dans les deux cas, PAC et moteur électrique permettent de diviser par trois la consommation d'énergie à l'utilisation, en utilisant de l'électricité plutôt que le combustible directement, mais comme le rendement du système électrique est de 1 tiers, le gain final est faible, voire négatif. On n'insistera jamais assez sur la cogénération...

Si l'on considère le chauffage dans le résidentiel et le tertiaire : la consommation totale d'énergie finale (au niveau de l'utilisateur) est de 500 TWh, le rendement de l'ordre de 80 %⁶⁹ soit 420 TWh de chaleur utile.

Avec une consommation totale de 250 TWh de combustible, la cogénération permet de produire 95 TWh électriques (rendement 38 %) et 130 TWh thermiques (rendement 52 %). Grâce au principe de la pompe à chaleur, ces 95 TWh électriques permettent à leur tour de produire $95 \times 3 = 290$ TWh de chaleur (COP de 3). Soit une production totale de chaleur de $130 + 290 = 420$ TWh.

Ainsi, il est possible de produire la même quantité de chaleur en consommant deux fois moins d'énergie (250 TWh au lieu de 500), dès lors que l'on associe cogénération et pompe à chaleur.

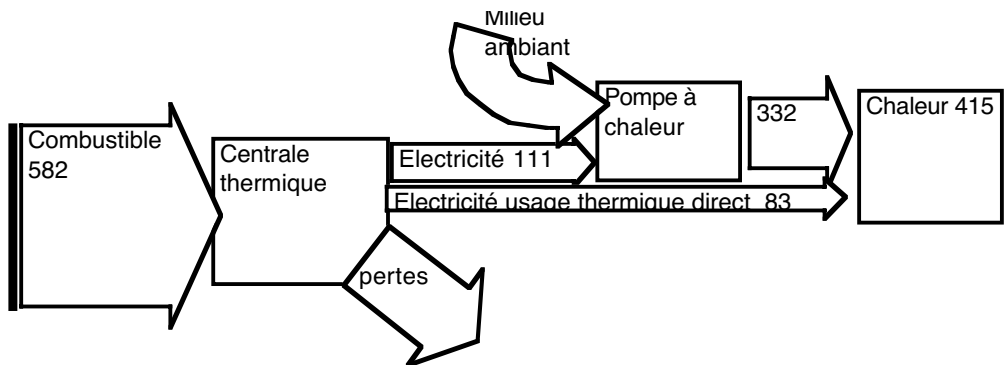
On peut parfaitement imaginer des centrales de cogénération alimentant un réseau de chaleur local, et dont l'électricité serait distribuée sur le réseau électrique pour alimenter les PAC des logements non raccordés au réseau de chaleur.

⁶⁹ il s'agit du rendement global à l'utilisation, qui intègre le rendement du chauffage au gaz, au fioul, à l'électricité, au bois...

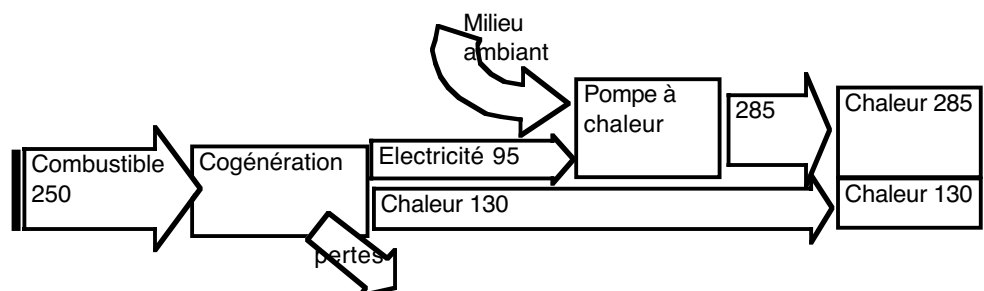
La question est de pouvoir disposer d'une source froide maintenue à au moins 10-15 °C en hiver : ce qui est obtenu facilement par exemple avec des capteurs solaires (d'autant que le rendement des capteurs augmente lorsque la température du fluide diminue).

Couverture des besoins de chauffage par pompe à chaleur

Pour assurer la couverture de 415 TWh thermiques du chauffage de l'habitat et du tertiaire, dont 80 % par pompe à chaleur et 20 % par effet direct (résistances électriques), avec production d'électricité par centrale thermique centralisée sans récupération de la chaleur, il est nécessaire de consommer 580 TWh de combustible en énergie primaire.



Si l'électricité est produite par cogénération avec récupération de chaleur des centrales, le besoin en combustible est de 250 TWh, soit plus de 2 fois moins.



7.9 Et au niveau mondial ?

◆ L'électricité

La production mondiale brute d'électricité était de 14.352 TWh en 1998⁷⁰, le nucléaire en représente 17 %, l'hydraulique 18,6 %, et les fossiles 63,9 %. La consommation nette s'élève à 12.365 TWh, soit une autoconsommation des centrales et des pertes en réseau de 14 % de la production brute. La production d'électricité nucléaire est un peu supérieure à ces pertes, et un peu inférieure à la production d'hydroélectricité. A elles seules, les pertes thermiques des centrales à combustible fossile sont au moins 5 fois supérieures à la production brute d'électricité nucléaire.

	Mtep	TWh
Consommation brute		39.400
	Nucléaire	660
	Renouvelables	246
	Centrales thermiques (combustibles fossiles)	2.500
Production brute		14.352
Dont :	Nucléaire	2.446
	Renouvelables	2.673
	Fossiles	9.175
Production nette		13.557
	Pertes distribution	1.209
Consommation finale		12.365
Dont :	Industrie	5.120
	Transports	193
	Résidentiel Tertiaire	6.495

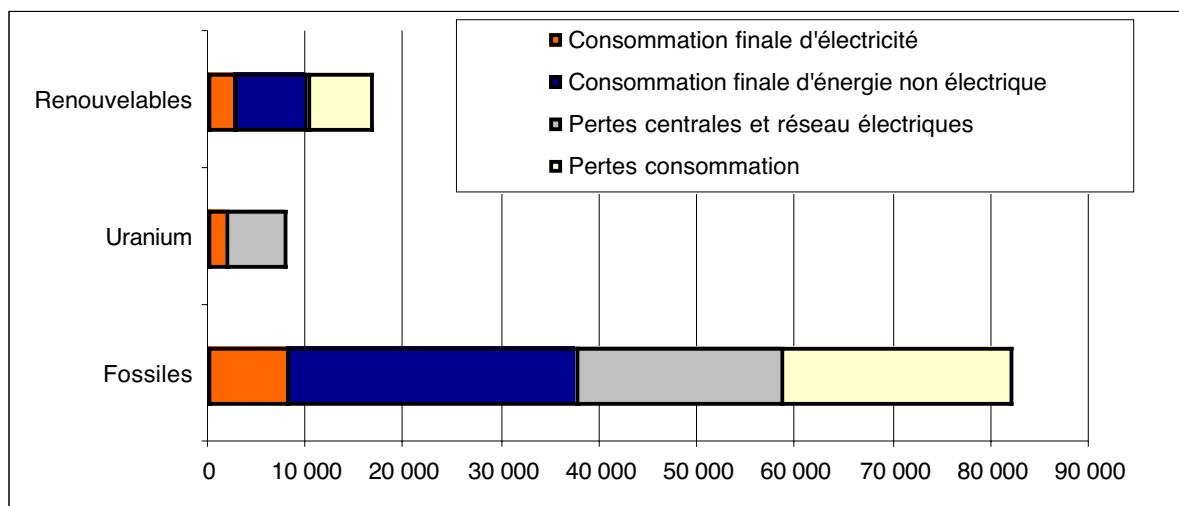
◆ L'ensemble de l'énergie

Une esquisse (très sommaire !) du bilan mondial de consommation d'énergie, sur les mêmes bases que celles utilisées ici pour la France, montre que le « rendement global » énergétique au niveau mondial est lui aussi proche des 50 %.

La structure des consommations et de l'approvisionnement n'est pas fondamentalement différente. Le plus gros écart vient bien sûr de la faible place du nucléaire au niveau mondial : moins de 7 % en production brute, 2,2 % en consommation finale.

⁷⁰ Sources : ENERDATA ©, juin 1999. www.enerdata.fr/images/analyse.pdf, et [/monde.pdf](http://monde.pdf), mais qui donne des indications incomplètes sur les renouvelables. L'AIE (Agence Internationale de l'Energie) www.iea.org/statist/key2001/keyworld2001.pdf, présente des données plus complètes, mais attention : toutes les énergies sont comptabilisées à 0,086 Mtep / TWh, sauf le nucléaire auquel on attribue un rendement de 33 %, soit 0,261 Mtep / TWh... Ce qui donne une contribution en consommation primaire de 6,8 % pour le nucléaire et 2,3 % pour l'hydraulique, alors que les productions électriques sont identiques ! La réalité est ensuite rétablie pour la consommation finale, mais alors l'électricité est comptabilisée comme un tout, sans ventilation par source.

⁷¹ Pour le nucléaire et les fossiles, la consommation brute de combustible « entrée centrales », en TWh, est calculée à partir des données en Mtep fournies par l'AIE et avec le coefficient 1 TWh = 11,62 Mtep. Les autres chiffres proviennent d'ENERDATA, ils sont cohérents avec ceux donnés par l'AIE.



Prétendre que le nucléaire constitue la principale réponse à l'effet de serre est un postulat, très discutable. Le gisement représenté par l'usage rationnel de l'énergie et la maîtrise de l'énergie, est supérieur d'un ordre de grandeur. Multiplier le nombre de centrales nucléaires par 5, récupérer la moitié de la chaleur non utilisée des centrales thermiques, améliorer le rendement global du système énergétique de 3 %, augmenter de moitié la production d'énergies renouvelables, sont des mesures qui reviennent chacune au même résultat en termes de fourniture d'énergie...

7.10 Les énergies renouvelables dans le scénario « APEP »

La contribution actuelle des renouvelables est la suivante (chiffres 2000) :

	TWh électriques	TWh thermiques
Bois	1,4	104,0
Hydraulique	73,6	
Déchets urbains	1,5	7,7
Biocarburants	0,0	3,9
Résidus de récolte	0,4	2,3
Géothermie	0,0	1,4
Biogaz	0,3	0,7
Solaire thermique	0,0	0,2
Eolien	0,1	
Photovoltaïque	0,010	
TOTAL	77	120

Par source :

TWh	APEP	Différence / actuel
Bois	222	117
Autres biomasses	87	70
Eolien	67	67
Solaire thermique	200	200
Géothermie, photovoltaïque...	14	13
Hydraulique	78	4
TOTAL	668	471

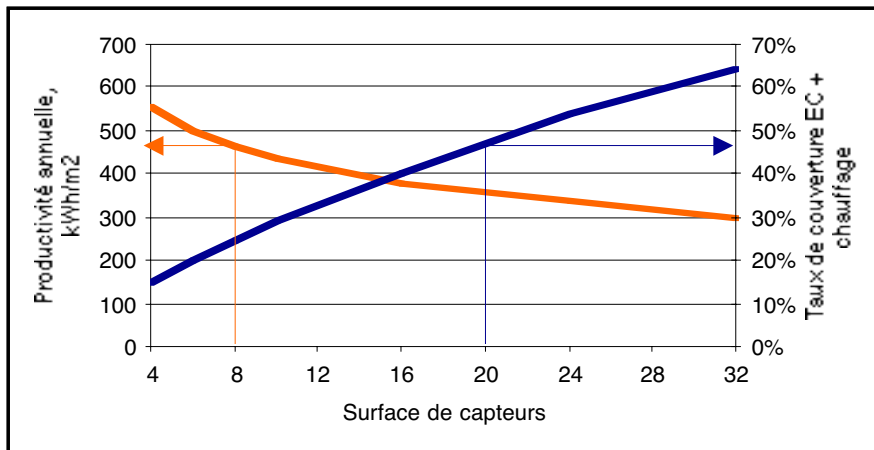
La contribution de l'éolien est très réaliste. L'hypothèse adoptée pour la biomasse (total 309 TWh ou 27 Mtep : + 150 %) est plus volontariste, mais reste loin du potentiel théorique. On peut proposer comme répartition la suivante : bois énergie y compris déchets de bois (+10 Mtep), biogaz (+4 Mtep), déchets et résidus de cultures (+1 Mtep), cultures énergétiques (+1 Mtep).

C'est surtout l'hypothèse sur le solaire qui est ambitieuse : non par rapport au gisement, mais parce qu'elle impose un taux d'équipement sans commune mesure avec le taux actuel (multiplication par 130). On va voir ci-dessous que cette hypothèse n'est pas aussi irréaliste qu'on peut l'imaginer en premier abord.

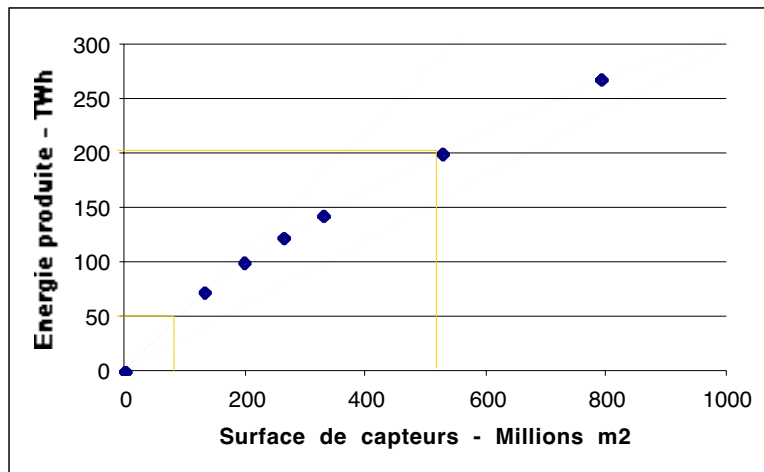
7.11 Le solaire, combien de millions de mètres carrés ?

Compte tenu de la saisonnalité (inversée) des apports solaires et des besoins de chauffage, le taux de couverture des besoins augmente lorsque la surface des capteurs croît, mais la productivité diminue.

Pour une habitation moyenne (besoins eau chaude de 3.000 kWh, besoin chauffage de 12.000 kWh, total 15.000 kWh), 4 m² de capteurs peuvent produire 2.200 kWh soit 15 % des besoins. Avec 20 m², le taux de couverture approche 50 % et la productivité diminue à 350 kWh/m².



En extrapolant à l'ensemble du parc de bâtiments (résidentiel, tertiaire, industrie...), il est possible d'établir une courbe théorique « surface de capteurs » / « énergie récupérée ». Les besoins totaux sont de l'ordre de 100 TWh pour l'eau chaude, et de 400 TWh pour le chauffage.



Les 70 premiers TWh correspondent à des besoins d'eau chaude (sur 100 TWh d'énergie utile, dans le résidentiel et le tertiaire), relativement constants sur l'année, et qui peuvent être assurés avec une productivité optimale (de l'ordre de 550 kWh/m²), soit 130 M m². Le scénario « sortie du nucléaire » suppose un recours au solaire thermique à hauteur de 20 à 50 TWh.

Dans un second temps, ce sont les usages mixtes eau chaude + chauffage, avec des productivités plus faibles du fait de la saisonnalité, qui peuvent être concernés : avec 200 M m²

supplémentaires, la production double pour atteindre 140 TWh. A ce stade, le solaire assure alors la quasi totalité de la production d'eau chaude, et près de 10 % des besoins de chauffage.

Enfin, les besoins d'eau chaude étant couverts, les capteurs supplémentaires couvrent uniquement des besoins de chauffage. Avec une nouvelle tranche de 200 Mm² supplémentaires, la production augmente de 56 TWh, avec une productivité marginale de 280 kWh/m². Ce niveau correspond au scénario « APEP » : soit 200 TWh pour 530 Mm².

Ces productivités n'intègrent pas le fait que dans le scénario APEP, les résidences « solarisées » sont capables de refouler l'excédent d'énergie solaire (surtout estivale) sur le réseau de chaleur. Celui-ci peut en effet fonctionner dans les deux sens (comme le réseau électrique). Les bâtiments solarisés alimentent ainsi en eau chaude les logements non solarisés : par exemple, un bâtiment avec 30 m² de capteurs solaires (il peut s'agir du local de la chaufferie collective) autoproduit la totalité de son chauffage, et (via le réseau de chaleur) l'eau chaude sanitaire de 6 à 7 autres logements pendant 5 mois, avec une productivité maximale.

En généralisant, nos 200 TWh solaires « APEP » peuvent être produits avec 360 Mm², mais comme tous les bâtiments solarisés ne sont pas raccordables à un réseau de chaleur, on retiendra l'hypothèse moyenne de 450 Mm². Soit peut-être (en ordre de grandeur) dans les 10 à 20 % de la surface totale des toitures de bâtiments résidentiels, tertiaires, industriels et agricoles.

En poursuivant sur un taux de croissance de +20 % par an, la surface installée serait de 15-20 Mm² en 2020 (soit 10 TWh), et atteindrait 450 Mm² vers 2045, soit 200TWh.

Mais un tel taux sur une aussi longue durée ne signifie pas grand-chose : pour atteindre 450 Mm², il est nécessaire d'installer 10 Mm² de capteurs par an pendant 45 ans (sans compter le renouvellement !), ou 20 Mm² / an pendant 25 ans pour atteindre cet objectif vers 2025.

D'un point de vue industriel, ceci n'est pourtant pas insurmontable : en comptant 500 Euro/m², la filière pèserait 10 milliards d'euros de chiffre d'affaire et 100.000 emplois, dont la moitié chez les constructeurs, ce qui représenterait 2 % des emplois salariés de l'industrie manufacturière.

7.12 APEP en pratique

Comment se traduit concrètement le scénario APEP ? On peut imaginer un paysage énergétique où dominent petites et moyennes centrales de cogénération, un paysage architectural où la toiture solaire est généralisée et s'intègre étroitement à la toiture traditionnelle, et des parcs éoliens sur terre et sur mer.

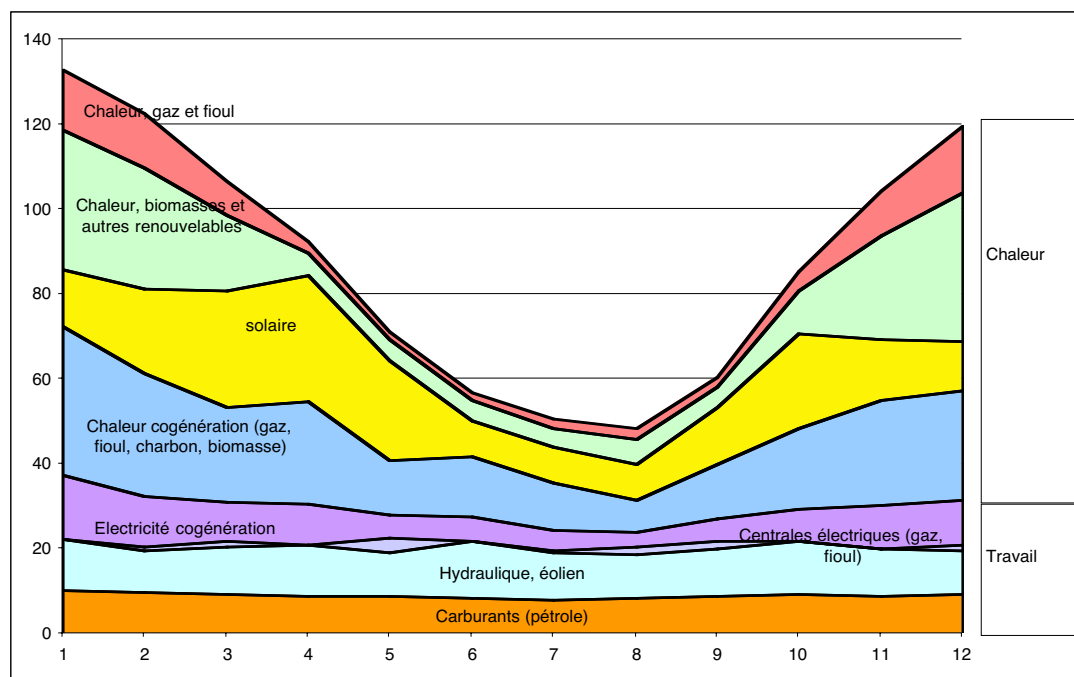
Un quart à un tiers des résidences – surtout en zone urbaine et en immeubles collectifs - sont desservies par un réseau de chaleur sur gaz, fioul, biomasse, alimentés par cogénération en base, et par des chaudières pour les pointes de consommation. Les résidences équipées en solaire – toutes ne peuvent pas l'être en zone urbaine – alimentent le réseau en été.

L'habitat rural est avant tout solaire avec un appoint biomasse, et les quartiers urbains non desservis par réseau de chaleur utilisent comme aujourd'hui gaz, fioul, propane, mais aussi solaire et pompes à chaleur.

Idem pour les industries, certaines d'entre elles étant raccordées aux réseaux de chaleur soit pour l'alimenter, soit pour s'y approvisionner.

L'électricité, dont les usages sont peu saisonnalisés, est assurée en base par les renouvelables (hydraulique, éolien) et en partie la cogénération, appelée en outre plus fortement en semi-base. Les réservoirs hydrauliques et les centrales thermiques assurent le lissage et les pointes d'appel de puissance. Les carburants pétroliers assurent encore l'essentiel des besoins des transports, hors propulsion électrique.

Le graphique suivant donne – à titre indicatif – les consommations d'énergie utile en TWh par mois, selon le scénario APEP (la consommation totale doit intégrer les rendements à l'utilisation et à la production d'énergie).



7.13 Dans quelle mesure le nucléaire a-t-il permis à la France de réduire ses émissions de gaz à effet de serre ?

Les émissions de GES dans le secteur de l'énergie sont passées de 2,4 tonnes de carbone par habitant à la fin des années 70, à environ 1,7 aujourd'hui. Soit près de 30 millions de tonnes de carbone, ou 23 % des émissions.

D'où viennent ces réductions ? Beaucoup de choses ont changé depuis 1979 en termes de besoins d'énergie : démographie, augmentation du PIB, déclin de la sidérurgie, essor des technologies de communication, mobilité, induisent des demandes d'énergie assez différentes d'il y a 20 ans. Détaillons donc les évolutions, sources par source, pour se faire une opinion, en gardant à l'esprit que les usages et besoins ne sont pas identiques entre 1979 et 2000.

Les chiffres qui suivent sont calculés à partir des consommations d'énergie par source (charbon, pétrole, gaz) et par secteur, avec des contenus en carbone pour chacun de ces sources (de 0,044 à 0,088 tC/TWh).

Par source d'énergie, les émissions dues au charbon ont diminué de 18 MtC, celles dues au pétrole de 21 MtC, et celles dues au gaz ont en revanche augmenté de 8 MtC.

La production d'électricité émettait 28 MtC en 1979, contre 11 MtC aujourd'hui, soit 17 MtC de réduction (-12 pour le charbon, -5 pour le pétrole). La contribution des transports a augmenté de 13 MtC. Pour les autres secteurs (consommations d'énergie hors électricité dans l'industrie, l'habitat, le tertiaire, les transports), ces réductions sont de 26 MtC.

Réduction de gaz carbonique en MtC entre 1979 et 2000

SECTEUR SOURCE	Production d'électricité	Transports	Autres	TOTAL
Charbon	-12		-6	-18
Pétrole	-5	+13	-28	-20
Gaz			+8	+8
TOTAL	-17	+13	-26	-30

Plusieurs phénomènes expliquent ces évolutions :

- le remplacement du charbon et du pétrole par le nucléaire, dans la production d'électricité, explique -17 MtC de réduction.
- Les émissions du secteur transport suivent l'augmentation des consommations de pétrole : +13 MtC.
- le remplacement (principalement pour le chauffage) du charbon et surtout du fioul, par du gaz à contenu carbone moindre, explique une réduction de 7 MtC⁷².

⁷² La diminution de la part du charbon et du pétrole au profit du gaz, se traduit par une diminution du « contenu carbone » des énergies fossiles consommées. En 1979, la France consommait (hors production d'électricité et transports) 95 Mtep d'énergies fossiles et émettait 74 MtC, soit un ratio de 0,78 tC/tep. En 2000, pour une consommation de 70 Mtep, ce ratio est de 0,68 tC/tep. Le contenu carbone a donc diminué de 0,1 tC/tep. Si nous avions consommé des énergies fossiles en même proportion qu'en 1979, nous aurions émis $70 \times 0,1 = 7$ MtC supplémentaires.

- Le solde des réductions ($30 - 17 + 13 - 7 = 19$ MtC) s'explique globalement par une réduction des consommations d'une part, et par la substitution de l'électricité nucléaire et d'énergies renouvelables dans des applications assurées, en 1979, par des énergies fossiles.

Il n'est pas possible de répartir de façon simple ces 19 MtC. Parmi ces évolutions les plus significatives on peut citer :

- le passage du chauffage au fioul ou au charbon, au chauffage électrique ou au bois. On peut estimer l'effet à une économie de l'ordre de 7 MtC⁷³.
- La substitution de l'électricité à des énergies fossiles dans l'industrie.
- Le déclin de la sidérurgie et la diminution de la consommation de charbon et de pétrole (4 MtC).
- L'amélioration de l'isolation des logements et d'une façon générale les efforts de maîtrise de l'énergie.

On peut tenter de déterminer à gros traits la part qui revient au nucléaire, et celle qui revient à d'autres actions.

Evolution des émissions de gaz carbonique (en MtC) entre 1979 et 2000

Part Nucléaire	-26
Production d'électricité	-17
Chauffage électrique	-3
Autres	-6
Part non nucléaire	-17
Diminution contenu carbone énergies fossiles	-7
Bois	-4
Déclin sidérurgie	-4
Autres	-2
Augmentation consommation transports	13
TOTAL en MtC	-30

Si l'on exclu le secteur de transports, pour lequel le nucléaire n'apporte pas de réponse aujourd'hui, on peut estimer que la substitution du pétrole par le gaz, le développement du bois énergie, le déclin de la sidérurgie, contribuent de façon significative à la diminution des GES : au moins pour 40 % de la diminution globale.

« Si la France n'avait pas développé le nucléaire, les émissions de GES auraient été supérieures ». Certes, mais ce postulat ne peut être accepté sans discussion : il repose en réalité sur une comparaison avec un scénario de référence, un autre possible... mais lequel ? La France aurait-elle promu le chauffage électrique si le parc nucléaire n'avait pas existé ? La priorité n'aurait-elle pas été donnée aux transports et à la maîtrise de l'énergie ?...

⁷³ La consommation d'énergies renouvelables (principalement le bois) a augmenté de 4 Mtep entre 1979 et 2000, ce qui correspond environ à 4 MtC économisés dans la mesure où elles se substituent à des énergies fossiles. De même, l'augmentation du chauffage électrique représente 33 TWh, correspondant environ à l'économie de 3 Mtep ou de 3 MtC si cette énergie avait été fournie par du fioul.