

## Avant propos

La "transition énergétique" fait actuellement débat dans le monde politique.

Mais de quelle transition énergétique s'agit-il ? Pour la plupart des intervenants, elle se limite à une éventuelle réduction de la part de l'énergie nucléaire, à un développement des énergies "solaires" et à des "économies" mal précisées si l'on excepte l'isolation des habitations.

Diminuer la part de l'énergie nucléaire, mais de quelle part s'agit-il ? De la part des besoins **actuels** en électricité dont le nucléaire satisfait actuellement près de 80% ? De la part du Nucléaire dans la satisfaction des besoins globaux en énergie primaire ? et quels seront nos besoins futurs en énergie électrique au moment où certains aspirent au développement de l'automobile électrique ?

Tout cela est vague, sous tendu par des positions purement politiques et idéologiques.

Personne ne m'a expliqué, écrit Marc Joanovici <sup>1</sup> *"comment on passait de 75 % à 50 % de nucléaire pour la production d'électricité. Je ne sais pas. Je m'inquiète du fait que François Hollande ne le sache pas non plus"*.

Le véritable problème est de savoir comment assurer nos besoins en énergie lorsque les combustibles fossiles que nous utilisons généreusement aujourd'hui seront en voie d'épuisement.

Pourra-t-on se passer du nucléaire ? Si oui, alors rien n'empêche de commencer, encore faudrait-il préalablement répondre à la question : à quel prix ? Si non, le réduire dans l'immédiat serait absurde et coûteux.

Ce qui importe est de réduire d'abord nos besoins en combustibles fossiles puisque ce sont eux qui sont appelés à disparaître inéluctablement. Cela améliorerait d'ailleurs notre balance commerciale chroniquement déficitaire et préparerait réellement l'avenir.

Car la véritable transition énergétique, que l'humanité devra inéluctablement affronter, est celle de l'épuisement des réserves de pétrole, Gaz et charbon.

Je vous propose, dans les pages qui suivent, d'examiner, quelles possibilités la France aurait d'assurer cette véritable transition énergétique. <sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Cf. [http://www.manicore.com/documentation/transition\\_energie.html](http://www.manicore.com/documentation/transition_energie.html)

<sup>2</sup> Certains reconnaîtront certains passages d'un texte précédent, daté de 2006 et intitulé : "Quelle énergie pour demain ?".

## La transition énergétique :

La transition énergétique est un impératif auquel l'humanité ne pourra pas échapper.

Il n'est pas envisageable de renoncer au progrès et à la qualité de vie dont nous bénéficions. Or cette qualité de vie nécessite beaucoup d'énergie. Beaucoup plus qu'aux temps préhistoriques, où la seule source d'énergie était le bois, utilisé, tout à la fois, pour le chauffage, la cuisson des aliments et l'éloignement des prédateurs.

Certes les besoins énergétiques par habitant ne croissent plus, et même décroissent <sup>3</sup>, lorsque le confort atteint un certain niveau (cas des pays développés). Cela, principalement en raison du progrès technique (*diminution par deux en quelques décennies de la consommation d'une automobile pour cent kilomètres parcourus, réduction par dix durant la même période de la consommation d'un poste de télévision, isolation améliorée des habitations, miniaturisation, etc.*).

Mais la croissance démographique est rapide et l'on nous dit (ONU) qu'elle pourrait atteindre, même en ralentissant, dix milliards d'individus avant la fin du siècle <sup>4</sup>.

Les besoins mondiaux vont donc continuer de croître en raison de la démographie et des aspirations légitimes au confort des pays en voie de développement.

Ce besoin d'énergie croissant a été satisfait, jusqu'ici et pour l'essentiel, par l'utilisation des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz).

Or cette ressource, accumulée au cours des temps géologiques (des millions d'années), n'est pas intarissable.

Les ressources en charbon, pétrole, gaz (dont le gaz de schiste) seront épuisées dans une ou quelques centaines d'années <sup>5</sup>.

---

<sup>3</sup> Ou si l'on est plus rigoureux : l'efficacité énergétique croît (l'efficacité énergétique est le rapport entre l'énergie consommée et le PIB).

<sup>4</sup> Nous avons dépassé aujourd'hui 7 milliards

Il est donc raisonnable, il est même impérieux, de se préoccuper de savoir de quelles ressources futures en énergie l'humanité pourra disposer.

Pour remplacer les énergies fossiles une transition énergétique s'impose et nécessite de recourir à des énergies de remplacement. Quelles seront-elles ? Tel est le vrai problème.

C'est une problématique qui devrait pouvoir faire l'objet d'une réflexion objective et rationnelle et, pourtant, elle se trouve polluée, voire dévoyée, par toute une série de considérations, idéologiques, philosophiques, politiques ...

Pour beaucoup, par un glissement sémantique, volontairement entretenu par certains, le problème de la transition énergétique se traduit étrangement sous la forme : "*sortir du nucléaire*".

Il est piquant de noter que les mêmes soutiennent qu'il faut accélérer le remplacement des énergies fossiles en raison du risque de réchauffement climatique induit par l'utilisation croissante des combustibles fossiles.

Ces deux propositions sont évidemment contradictoires : le nucléaire n'envoie pas de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et vouloir sortir du nucléaire pour éviter le réchauffement climatique est absurde.

Remarquons au passage que l'augmentation, indéniable, du CO<sub>2</sub> atmosphérique n'est pas nécessairement la seule cause du réchauffement constaté au XX<sup>e</sup> siècle, à la sortie du petit âge glaciaire, et que son incidence a, sans doute, été surévaluée par les modèles <sup>6</sup>.

Quoi qu'il en soit, la peur d'un éventuel réchauffement climatique conséquent de la combustion du charbon, du pétrole, du gaz et autres énergies fossiles, même si elle est inutile, n'est pas contradictoire avec la question que nous pose le vrai problème : comment satisfaire les besoins en énergie de l'humanité après l'épuisement des ressources en combustibles fossiles ?

...

L'énergie récupérable sur Terre n'a que deux origines, d'une part la fusion et la fission nucléaires, d'autre part la gravité.

---

<sup>5</sup> Peut être pas épuisées au sens strict du terme, mais exploitables à un coût économiquement insupportable.

<sup>6</sup> Voir « l'homme est-il responsable du réchauffement climatique » et [www.andreleg.fr](http://www.andreleg.fr)

Certains vont s'esclaffer en disant que j'oublie, excusez du peu, l'énergie solaire.

Ils auront pourtant tort : comme vous le savez, l'énergie solaire reçue par notre planète n'est qu'une faible fraction de l'énergie émise par notre étoile, dont l'origine est la fusion nucléaire.

Le soleil n'est, de fait, qu'un gigantesque réacteur de fusion nucléaire. Il est vrai, distant de 150 millions de kilomètres de notre planète.

De même "l'énergie géothermique" n'est que la chaleur dégagée par la radioactivité interne du globe terrestre.

...

Toutefois, il est habituel de considérer que l'énergie utilisable sur Terre est celle qui parvient jusqu'à nous sous forme du rayonnement solaire, du flux de chaleur géothermique ou qui résulte de la gravité (chutes d'eau, marées).

Dans la pratique, ces énergies sont utilisées sous leur forme directe (par exemple : le rayonnement solaire thermique) ou sous leurs formes secondaires (par exemple : le vent ou les courants marins).

L'ensemble des énergies utilisables (hors combustibles fossiles) peut alors être classé en différentes rubriques, comme le propose le tableau ci-après :

<b><i>nucléaire</i></b>	<b><i>Solaire</i></b>	<b><i>gravité</i></b>
Géothermie	Energie hydraulique	
fission	Solaire thermique	Energie des marées
	Courants marins	
surgénération	Photovoltaïque	
Fusion	Biomasse	
	éolien	

D'aucuns voudront ergoter et diront qu'il existe plus de rubriques et, partant, plus de solutions.

Certes, on peut distinguer l'éolien terrestre et l'éolien off shore, voire l'éolien sous forme de houle. Mais on pourrait aussi bien considérer le type des éoliennes, leur puissance, etc. De toute manière, la source d'énergie reste la même : le vent et c'est ce qui importe.

Pour notre réflexion sur les possibilités de remplacement des combustibles fossiles, il est inutile d'entrer dans le détail des variantes techniques utilisables. En revanche, certaines caractéristiques essentielles doivent retenir notre attention.

## **Le solaire**

Si l'on excepte la biomasse et les retenues d'eau alimentant des centrales électriques, qui, d'une certaine manière, sont des stockages de l'énergie solaire, les énergies solaires sont des énergies aléatoires, ou si vous préférez intermittentes, qui dépendent de l'humeur du temps qu'il fait ou de l'heure du jour.

Car le soleil ne luit pas la nuit ou par temps couvert et le vent est fantasque.

L'énergie solaire sous la forme de l'énergie photovoltaïque ou éolienne ne peut pas, sans stockage, assurer la continuité de la satisfaction des besoins.

Une autre caractéristique de l'énergie solaire est la faible quantité d'énergie disponible par unité de surface terrestre.

L'exemple le plus approprié est celui de l'énergie photovoltaïque dont la productibilité est directement liée à la surface.

D'après l'institut national de l'énergie solaire (INES) <sup>77</sup> : « *l'énergie lumineuse incidente, sous les latitudes moyennes telles que celle de la France, est d'environ 1 000 kWh/m<sup>2</sup> par an sur un plan horizontal* ».

Ce faisant l'INES commet une grossière erreur en confondant l'irradiation au voisinage de la terre et celle reçue par m<sup>2</sup> de la surface terrestre.

Comme le montre l'annexe 1, ci-jointe, la productibilité photovoltaïque d'un mètre carré moyen de la surface métropolitaine ne dépasse pas, pratiquement,

---

<sup>77</sup> L'INES est le centre français de référence dans le domaine du solaire. Porté par le Conseil Général de la Savoie et la Région Rhône-Alpes avec les équipes du CEA, du CNRS, de l'Université de Savoie et du CSTB, il est situé sur les rives du lac du Bourget.

40 kwh / an, autorisant, par exemple, l'utilisation d'une lampe de 20 w, seulement 6 heures par jour.

Enfin, contrairement à une idée reçue qui a la vie dure, l'énergie solaire n'est pas bon marché.

Fabriquer des cellules photovoltaïques et les convertisseurs associés <sup>8</sup> ou construire une éolienne n'est pas gratuit, installer l'éolienne off shore et la relier au réseau de distribution ne l'est pas non plus.

Mais, surtout, il faut pallier l'intermittence !

La solution actuelle consiste à utiliser les retenues d'eau et l'énergie supplétive fournie par des turbines à gaz pouvant être mises rapidement en régime ou arrêtées. Mais lorsque l'on n'aura plus de gaz ? Or cette situation est justement celle que nous voulons considérer.

Il faudra stocker !

(A moins , évidemment, d'accepter que les trains s'arrêtent, comme le film que vous êtes entrain de regarder à la télévision, lorsqu'il fait nuit et que le vent faiblit).

Certes, il existe des solutions intelligentes de stockage telles que celles des Stations de Transfert d'Energie par Pompage (STEP). <sup>9</sup>

Mais les STEP demandent des sites de configuration particulière et si la France a pu installer à Grand'maison (Isère) sa centrale hydroélectrique la plus importante <sup>10</sup> avec un réservoir supérieur ayant un volume de 132 millions de mètres cubes et une hauteur de chute de 900 m, le nombre de sites français pouvant être équipés est très limité.

Reste, me direz-vous, le stockage électrochimique, le stockage sous forme de chaleur, sous forme d'air comprimé, sous forme d'hydrogène ...

---

<sup>8</sup> Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu, qu'il faut transformer en courant alternatif pour l'envoyer sur le réseau.

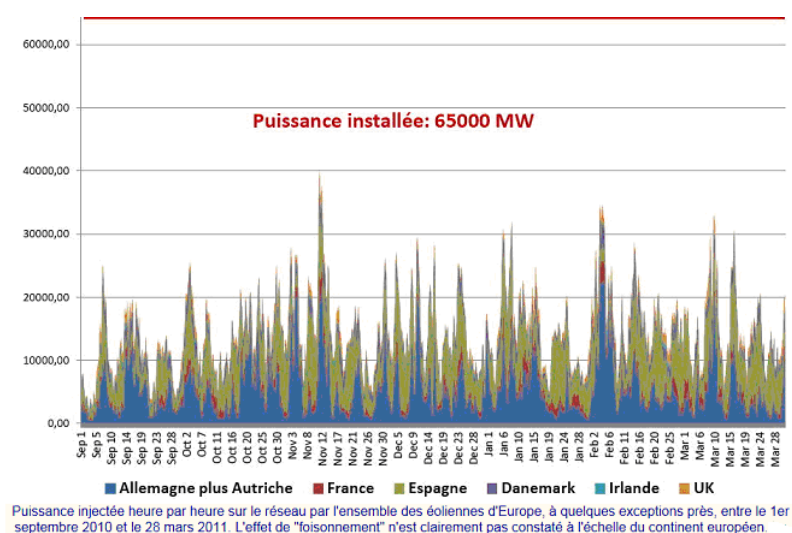
<sup>9</sup> Cette solution utilise l'énergie excédentaire produite pour pomper de l'eau d'un réservoir inférieur vers un réservoir supérieur, puis, lorsque la production est inférieure à la demande, à turbiner l'eau chutant du réservoir supérieur vers le réservoir inférieur.

<sup>10</sup> La puissance installée est de 1800 MW.

Mais il convient de ne pas oublier que le stockage et la restitution d'énergie ont un rendement et que les batteries d'accumulateurs, les compresseurs et les turbines ne sont pas gratuits.

A titre indicatif, l'investissement pour l'obtention de 1 Kwh est cinq à quinze fois plus important (stockage compris) pour le photovoltaïque et l'éolien que pour le nucléaire. Quant à la pollution, faut-il redouter plus le stockage maîtrisé des déchets radioactifs que celui du plomb ou du cadmium ?

Certains ont pu penser que la multiplication des éoliennes, dont la puissance unitaire peut varier d'un facteur 10 en vingt quatre heures, pourrait pallier la difficulté de l'intermittence : « *il y aura toujours du vent quelque part* ». Malheureusement les faits sont têtus et en Europe occidentale le parc européen produit significativement en cas de dépression atlantique, sinon très peu, comme le montre le graphe ci-après <sup>11</sup>.



D'autres invoquent le fait que l'énergie éolienne permet au Danemark de produire l'équivalent de 30% de sa consommation d'électricité.

La vérité réside dans le mot « équivalent ».

En réalité, le Danemark n'assure pas le tiers de sa consommation d'électricité grâce à l'énergie éolienne. Il exporte cette quantité vers la Suède et la Norvège (marché Nordpool) en périodes ventées. Ces pays réduisent alors leurs productions hydroélectriques et peuvent vendre l'énergie hydraulique, ainsi économisée, au Danemark, lorsque le vent arrête de souffler.

<sup>11</sup> Dû à Marc Jancovici ( <http://www.manicore.com/actualites.html> )

Bien que les Danois évitent ainsi des frais de stockage, ils paient néanmoins, d'après l'Agence Internationale de l'Energie, leur électricité beaucoup plus cher que partout en Europe (2 fois et demi le prix payé par les consommateurs français).

Ainsi, l'énergie solaire, notamment sous ses formes éolienne et photovoltaïque, est intermittente, demande beaucoup de surface et est loin d'être gratuite.

Mais la consommation future d'énergie de l'humanité pourrait-elle s'en passer ? et le remplacement du nucléaire par ces types d'énergie serait-il justifié en France métropolitaine ?

L'annexe 2 tente d'estimer la quantité d'énergie d'origine solaire qui pourrait concourir à la satisfaction des besoins de la France.

Avec un optimisme peut-être excessif, cette annexe conclut à un potentiel d'énergie primaire renouvelable de 133 Mtep.<sup>12</sup>

C'est important, mais ce n'est que la moitié de notre consommation actuelle de 265 Mtep.

Oui, mais il faut compter avec les économies d'énergie diront, en sautant comme des cabris, ceux qui pensent que la consommation, et particulièrement la consommation d'énergie, c'est le gaspillage et l'aliénation.

Bien évidemment, il conviendra d'augmenter l'efficacité énergétique, qui est d'ailleurs un objectif consensuel. C'est aussi une réalité, j'en ai rappelé quelques exemples. Cependant, diviser notre consommation d'énergie par deux est loin d'être évident, alors que la population résidant en France est croissante.

---

<sup>12</sup> Rappelons, pour éviter les erreurs que l'on rencontre souvent, que pour les énergies intermittentes (photovoltaïque, éolien etc.) tous les raisonnements en puissances installées manquent totalement de sens. Tout dépend en effet du nombre d'heures productives pendant lesquelles souffle un vent de vitesse suffisante ou brille le soleil à l'azimut convenable. Cela conduit à installer, par exemple, 4 à 5 Mw d'éolien pour remplacer 1 Mw nucléaire.



Une contribution aussi importante des énergies photoélectriques et éoliennes exigera, comme nous l'avons vu, un stockage <sup>13</sup>. Les solutions de stockage sont nombreuses : batteries classiques, batteries redox, production d'hydrogène ; stations de pompage ; volants d'inertie ; stockage sous forme de chaleur ... Mais ces solutions ont un rendement. L'énergie primaire potentielle s'en trouvera réduite d'environ trente pour cent, limitant ainsi à 90 Mtep le potentiel espéré. Et, bien sûr, un tel stockage sera coûteux.

Alors , peut-on se priver de l'apport de l'énergie nucléaire ?

### **Le nucléaire :**

En 2012, les centrales nucléaires françaises ont produit 400 Twh ce qui correspond à une énergie primaire de 111 Mtep.

Pour assurer une production équivalente, il eut fallu des centrales thermiques qui auraient consommé plus de 100 millions de tonnes de charbon et envoyé dans l'atmosphère 350 millions de tonnes de CO2 accompagnées de 5 millions de tonnes d'oxydes d'azote (pollution par l'ozone) et de plus d'un million de tonnes de dioxyde de soufre (pluies acides).

L'énergie nucléaire apparaît donc comme une réponse séduisante, mais ceci n'empêche pas certains de réclamer "la sortie du nucléaire".

Leurs raisons sont la crainte d'un accident majeur entraînant une augmentation de la radioactivité ambiante et la nécessité d'un stockage de déchets qui continueraient d'être radioactifs durant des milliers d'années.

Accessoirement, Ils critiquent la nécessaire centralisation d'une production d'énergie nucléaire qu'ils jugent technocratique et antidémocratique ; il font également état du caractère éphémère de cette production d'énergie en raison de l'épuisement à terme des gisements d'uranium.

---

<sup>13</sup> Les réseaux peuvent supporter de légères variations dans la demande des usagers tout comme de légères variations dans les quantités d'énergie reçues. Mais, mêmes les réseaux "intelligents" ne peuvent supporter des variations brutales et importantes de la demande. ou des énergies reçues, sans faire appel à des possibilités de stockage ou de délivrance instantanée d'énergie comme le font actuellement les turbines à gaz.

Concernant ces raisons accessoires, oublions la première qui appartient à l'idéologie politique et dont chacun peut penser ce qu'il veut. Mais arrêtons nous sur la seconde qui serait plus fondée, si elle était avérée.

Elle prend en compte que seul l'isotope 235 soit 0,7 % seulement de l'uranium contenu dans le minerai serait utilisable.

C'est oublier la surgénération (cf. annexe 3) qui permettrait de multiplier les réserves par 100. Cette dernière est d'ailleurs partiellement mise en œuvre actuellement en recyclant l'uranium 238 et le plutonium (combustibles MOX).

C'est oublier que des réacteurs à neutrons rapides permettraient l'utilisation du thorium beaucoup plus abondant que l'uranium dans l'écorce terrestre.

C'est oublier, enfin, que des réacteurs ne mettant plus en œuvre la fission atomique <sup>14</sup> mais la fusion sont envisageables comme se propose de le prouver le réacteur ITER, en cours de construction à Cadarache.

Reste la crainte fondamentale, celle d'un accroissement de la radioactivité consécutive à un accident. Peur qui est entretenue par les médias et par les accidents survenus. Crainte de la radioactivité qui n'est pas détectable par nos sens, dont les effets sont insidieux et peuvent engendrer des cancers.

Concernant les accidents, trois accidents majeurs se sont produits et nul n'en ignore les noms : "Three Mile Island", Tchernobyl et Fukushima.

Ce qui est moins connu est, si l'on excepte Tchernobyl, la relative modestie des conséquences humaines. ("Fukushima" a causé beaucoup de victimes mais elles sont directement consécutives du Tsunami et du séisme et non de l'accident nucléaire engendré par les phénomènes naturels).

Concernant Tchernobyl, il existe encore aujourd'hui, une bataille de chiffres entre certaines ONG <sup>15</sup> et les organismes officiels.

L'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) concluait dans son rapport de 2013, confirmant celui de 2008 :

---

<sup>14</sup> Lorsqu'un noyau d'U235 absorbe un neutron, il devient instable se casse en deux fragments (produits de fission) et émet 2 à 3 neutrons. Cette multiplication des neutrons permet d'entretenir une "réaction en chaîne".

<sup>15</sup> Un rapport de Greenpeace concluait en 2011, à l'occasion du 25ème anniversaire de l'accident, "que 200.000 décès dus à la catastrophe auraient déjà été constatés ces 15 dernières années en Russie, Biélorussie et Ukraine". Certaines télévisions faisaient état de nombres supérieurs.

*"Les doses élevées reçues par les 134 employés de l'usine et travailleurs d'urgence ont été fatales pour 28 personnes au cours des premiers mois suivant l'accident. Bien qu'au cours des 20 années suivantes, 19 décès aient été constatés parmi les survivants, aucun ne peut être attribué à l'exposition aux rayonnements.*

*Parmi les centaines de milliers de personnes impliquées dans les opérations de récupération, il n'y a pas, à ce jour, de preuve consistante d'effets sur la santé attribuables à l'exposition aux rayonnements bien que, pour les personnes ayant reçues les doses les plus élevées, les indications de leucémies et de cataractes aient augmenté.*

*Une augmentation substantielle de l'incidence du cancer de la thyroïde chez les personnes exposées aux rayonnements de l'accident alors qu'elles étaient enfants ou adolescents en 1986 a été observée au Bélarus, en Ukraine et quatre des régions les plus touchées de la Fédération de Russie. Pour la période 1991-2005, plus de 6000 cas ont été signalés, dont une grande partie pourrait être attribué au fait d'avoir bu en 1986 du lait contaminé par l'iode 131, seuls 15 cas avaient été fatals jusqu'en 2005."*

Ces conclusions, qui restent très en deçà des annonces médiatiques n'en sont pas moins affligeantes. Mais elles doivent être relativisées.

Durant les vingt années écoulées considérées, l'exploitation des mines de charbon est responsable de milliers de morts causées par accidents ou par la silicose ; des milliers de morts ont été conséquentes de la rupture de barrages ; des catastrophes écologiques ont résulté de naufrages de navires pétroliers ... Tchernobyl a fait finalement moins de morts, immédiats et futurs que l'explosion survenue à l'usine de pesticides de Bhopal (Inde) en 1984, les accidents de la route, rien qu'en France, ont fait 100.000 morts ...

L'angoisse particulière qui accompagne les accidents nucléaires est, comme je l'ai rappelé plus haut, la conséquence de l'ignorance de ce qu'est la radioactivité.

La radioactivité est un phénomène naturel. Nous vivons dans un environnement radioactif, (notre corps est également radioactif en raison du carbone 14 et du potassium 40 qu'il contient). Nous respirons en permanence du radon et nous

subissons le rayonnement cosmique qui nous parvient des étoiles et notamment de notre étoile, le Soleil.

Nous recevons donc au cours de notre vie une certaine **dose** de rayonnements ionisants qui varie avec le lieu où nous vivons (plus ou moins d'uranium et de thorium dans le sol <sup>16</sup>) et l'altitude (plus ou moins de rayons cosmiques).

Si la radioactivité relâchée dans l'atmosphère lors de la catastrophe de Tchernobyl a été très importante, il faut savoir qu'elle a été 20 fois inférieure à la radioactivité du radon relâché chaque année par l'écorce terrestre et 7000 fois inférieure à la radioactivité contenue dans les océans.

L'autre raison de l'angoisse liée à la radioactivité est la liaison qui est faite avec le cancer. Celle-ci n'est pourtant qu'une probabilité. La probabilité de cancer mortel, conséquence du nuage de Tchernobyl, est estimée, pour les 70 ans qui suivront la catastrophe de 1986, entre 0 et 7000 cancers pour les 350 millions d'habitants d'Europe occidentale <sup>17</sup>. Pour relativiser, il faut rappeler que, pour la même période et la même population, le nombre de décès par cancers dépassera 60 à 70 millions dont plus de 10 millions seront attribuables à la fumée de cigarette et à peu près autant à l'abus d'alcool.

La deuxième raison d'opposition à l'énergie nucléaire concerne les déchets <sup>18</sup>.

Si le problème des déchets est devenu une préoccupation importante de l'humanité, celui des déchets nucléaires inquiète particulièrement en raison de l'angoisse que déclenche le mot nucléaire (guerre nucléaire, Hiroshima, Tchernobyl, cancer ... <sup>19</sup>) et du fait que la radioactivité des déchets nucléaires ne disparaîtra qu'au terme de milliers d'années.

---

<sup>16</sup> La région indienne du Kerala ou certaines plages du Brésil, où s'ébattent pourtant joyeusement des familles entières, présentent une radioactivité 8 à 15 fois supérieure à celle de la région parisienne. En France même, la radioactivité du sol est, en Corse, trois fois supérieure à celle du bassin parisien.

<sup>17</sup> Comme nous le savons par le rapport de l'UNSCEAR, le nombre de décès probables sera plus élevé pour la Biélorussie, l'Ukraine et la Russie.

<sup>18</sup> Il s'agit ici des déchets liés à la production d'énergie, mais le problème existe déjà pour les applications militaires et, dans une moindre mesure, médicales.

<sup>19</sup> Le corps médical a d'ailleurs rebaptisé pour cette raison "imagerie par résonance magnétique " (IRM) les examens précédemment désignés sous l'appellation "résonance magnétique nucléaire" (RMN)

Le problème n'est cependant pas sans solutions (annexe n°4). Des solutions de traitement existent déjà pour les combustibles usés et sont envisagées pour les autres déchets sous forme de confinement fiable ou d'incinération <sup>20</sup>.

Il faut d'ailleurs, encore une fois, relativiser et savoir qu'aujourd'hui les cendres des centrales utilisant, dans le Monde, le charbon comme combustible sont globalement plus radioactives que la totalité des déchets nucléaires des centrales atomiques.

---

<sup>20</sup> Le terme "incinération" est approprié car il s'agit bien de "brûler" le plutonium et les autres transuraniens en produisant, complémentairement, de l'énergie.

## **Conclusion :**

L'épuisement des réserves de combustibles fossiles nous contraindra à plus ou moins long terme à une transition énergétique.

Certains demandent d'ailleurs, sans attendre, une diminution de l'emploi des combustibles fossiles pour limiter le rejet dans l'atmosphère de CO<sub>2</sub>, accusé de provoquer un réchauffement climatique.

La transition énergétique peut s'appuyer sur trois moyens essentiels :

- Les économies d'énergie
- L'utilisation des énergies renouvelables.
- L'utilisation de l'énergie nucléaire.

Je n'aime pas beaucoup le terme "économies" dont la connotation me rappelle fâcheusement les restrictions et le rationnement de la période 1940-49, je lui préfère de beaucoup le terme "efficacité énergétique".

Sous un aspect sémantique anodin, se cache en réalité des philosophies différentes.

Etre efficace, c'est consommer le minimum d'énergie pour atteindre un certain niveau de vie. C'est ce que les économistes traduisent par le terme "intensité énergétique", celle-ci étant exprimée en tep (tonne équivalent pétrole) par unité de PIB (Produit intérieur brut) <sup>21</sup>.

On peut évidemment envisager une baisse du niveau de vie, comme les adeptes de la décroissance le préconisent. Je préfère améliorer l'intensité énergétique !

Un exemple parlant est celui du chauffage des habitations; On peut envisager, dans le cadre d'une société de sobriété, de limiter arbitrairement la température autorisée et punir les infractions. Mais il me paraît préférable, sans gaspillage, d'accroître l'isolation des immeubles, la généralisation des doubles vitrages ainsi que le rendement de la source de chaleur et des échanges de température et de construire des bâtiments bien orientés.

Quoi qu'il en soit, et compte tenu de la remarque sémantique qui précède, un très large consensus s'affirme, très logiquement, en faveur de la solution

---

<sup>21</sup> Pratiquement en tep (tonne équivalent pétrole) pour 1000 dollars de PIB.

"économies d'énergies" qui peut aussi couvrir le domaine du recyclage, ou si l'on préfère, en faveur de la solution d'accroissement de l'intensité énergétique.

Ensuite le choix entre énergies solaires et énergies nucléaires fait l'objet de multiples controverses. Je pense pourtant qu'il faut cesser d'opposer les unes aux autres.

J'utilise le pluriel, car les énergies renouvelables couvrent une large gamme. Mais ces énergies ne sont pas, comme le pensent naïvement certains, illimitées et gratuites. La plupart nécessitent beaucoup de surface et peuvent, de ce fait, entrer en concurrence avec les cultures vivrières. C'est le cas notamment des biocarburants. Enfin la plupart sont intermittentes et nécessiteront une conversion et un stockage ce qui augmentera considérablement leur coût.

Je continue à utiliser le pluriel pour les énergies nucléaires qui couvrent également toute une gamme : réacteurs utilisant la fission pour produire de la chaleur (à très haute température) ou de l'électricité, surgénérateurs, réacteurs hybrides, réacteurs utilisant la fusion (cf. ITER).

L'utilisation du nucléaire pose le problème de la sécurité (comme la plupart des activités humaines) et celui des déchets pouvant rester très longtemps radioactifs. Ces problèmes sont en voie de solution (cf. annexe 4).

Alors, refusons le dogmatisme idéologique, les peurs entretenues, l'angoisse devant le développement technique qui s'allient pour justifier à tout bout de champ l'application du « principe de précaution »<sup>22</sup>.

Appliquons-nous, en revanche, à minimiser les risques dans toutes nos activités.

Refusons le dilemme "nucléaire ou solaire". Utilisons l'ensemble des moyens à notre disposition, notre savoir-faire nucléaire comme les avantages

---

<sup>22</sup> Sous une apparence de sagesse, le principe de précaution n'est souvent qu'un refus des responsabilités. Il permet, notamment aux hommes politiques, de rejeter en bloc, sans avoir à justifier leur position, ni à réfléchir pour trouver des solutions palliatives ou alternatives. Chacun a le droit d'en penser ce qu'il veut, mais je n'aime pas l'abus que l'on fait du principe de précaution qui aurait donné raison à l'oncle Vania (Personnage du roman préhistorique de Ron Lewis "Pourquoi j'ai mangé mon père"). Dans ce roman, "l'oncle Vania" s'oppose à l'usage du feu en raison du risque encouru. Bien heureusement pour son évolution, l'humanité n'a pas pour autant renoncé à l'usage du feu, mais a appris à en minimiser le risque.

naturels dont nous pouvons disposer. Et n'oublions pas de tenir compte des coûts, nos moyens de financement ne sont pas plus extensibles que les réserves de combustibles fossiles.

Ceci n'empêche pas, bien au contraire, de stimuler plus encore la recherche pour accroître notre efficacité énergétique, qui est, d'évidence, une priorité en généralisant l'application des pratiques et technologies réellement efficaces allant dans ce sens.

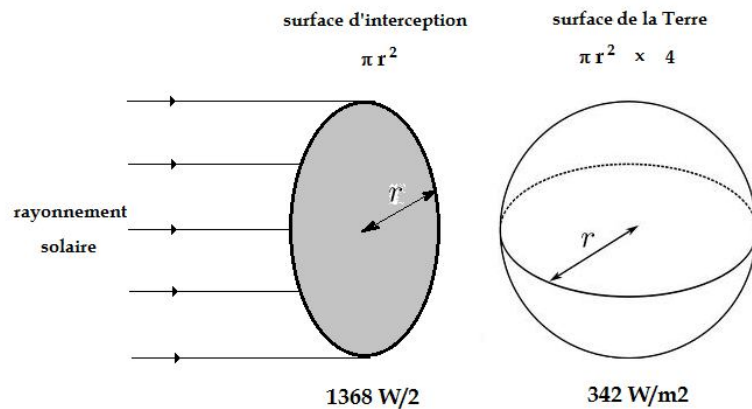


## Annexe 1

### Calculs de coin de table pour l'énergie photovoltaïque

Le rayonnement solaire intercepté, au voisinage de la terre, par un grand cercle terrestre est de 1368 w/m<sup>2</sup>.

La surface de la sphère étant égale à quatre fois celle d'un grand cercle chaque m<sup>2</sup> terrestre recevra en moyenne, au sommet de l'atmosphère, 1368 /4 = 342 W/m<sup>2</sup>.



Mais en traversant l'atmosphère une partie du rayonnement solaire est réfléchi ou diffusé et l'irradiation à la surface du globe n'est plus que de 342- 102 = 240 W/ m<sup>2</sup>.

Cette valeur est une moyenne et varie évidemment avec la latitude. Pour les latitudes moyennes, comme celle de la France, l'irradiation moyenne par m<sup>2</sup> est de 240 x 300 /342 = 210 W/m<sup>2</sup>.

L'irradiation utile pour l'effet photoélectrique (les longueurs d'ondes concernées) avec des cellules au silicium est de l'ordre de 85 % et réduit cette dernière valeur à 210 x 0.9 = 178,5 W/m<sup>2</sup>, arrondi à 180 W/m<sup>2</sup>.

Pour 2000 heures annuelles d'irradiation utile, qui représente la moyenne française, la disponibilité brute au m<sup>2</sup> serait de 360.000 Wh ou 360 Kwh .

*(hélas, beaucoup d'articles, y compris ceux publiés par des organismes officiels, non des moindres donnent des valeurs beaucoup plus élevées.*

*Soit qu'ils oublient, comme l'INES, de diviser par quatre l'irradiance au voisinage de la terre pour la rapporter au m<sup>2</sup> du globe, soit qu'ils oublient qu'une partie de l'énergie reçue au sommet de l'atmosphère ne parvient pas au sol mais est réfléchie ou diffusée, soit que leur enthousiasme prosélyte les entraîne à commettre d'autres erreurs).*

Mais le rendement des cellules au silicium est de 6 % pour le silicium amorphe et de 15 % pour le silicium polycristallin <sup>23</sup>. De plus le rendement dépend de l'orientation et de l'inclinaison des panneaux solaires qui, lorsqu'on les pose en toiture, ne sont pas toujours optimales.

Nous admettrons donc un rendement pratique de 10%, (valeur optimiste, qui néglige la conversion de courant continu en courant alternatif <sup>24</sup>, les pertes des réseaux de transport et de distribution et la qualité médiocre des panneaux solaires chinois qui équipent, de fait, la France et l'Allemagne), ce qui ramène à 36 kwh/an la productibilité d'un mètre carré **moyen** de la surface métropolitaine. Cela est loin d'être négligeable, mais n'autorise tout de même que l'utilisation d'une lampe de 20 watts durant 20 % du temps.

---

<sup>23</sup> Il existe en laboratoire d'autres solutions que le silicium qui offrent un rendement supérieur. Mais est-il raisonnable de considérer leur industrialisation alors qu'il s'agit de composés binaires de tellure-cadmium ou ternaires de cuivre-indium-sélénium associés à une couche de séléniure de cadmium, incluant des métaux rares ou toxiques ? Des molécules organiques voisines des colorants sont également envisagées, mais la technique est actuellement balbutiante.

<sup>24</sup> Une cellule photovoltaïque délivre du courant continu qu'il faut donc convertir en courant alternatif pour l'envoyer sur le réseau.

## Annexe 2

### **Calculs de coin de table pour la productibilité des énergies renouvelables en France.**

Beaucoup de déclarations, et même des ouvrages entiers, sur les énergies renouvelables ne font pas l'effort d'un essai de quantification dont il faut convenir qu'il est difficile et risqué ( *la prévision est difficile ... surtout lorsqu'elle concerne l'avenir*, disait Pierre Dac).

Je me suis cependant livré à quelques calculs de coin de table autorisant une approche des ordres de grandeur. Ces estimations sont évidemment discutables, mais elles ont le mérite d'être explicitées. Chacun peut alors en apprécier le caractère, pessimiste ou optimiste.

Comparer des consommations d'énergie sous différentes formes n'est pas évident, on ne peut additionner des choux et des carottes, des tonnes de bois secs, des mètres cubes de gaz ou des tonnes de pétrole. Il faut alors recourir à des équivalences. La véritable unité commune serait le joule mais l'habitude a été prise d'utiliser la tonne d'équivalent pétrole (tep), plus parlante pour le commun des mortels.

Cette simplification ne résout cependant pas tous les problèmes, et l'encadré ci-dessous explicite certains des coefficients de conversion utilisés.

Il faut distinguer, d'une part, la **consommation d'énergie finale** qui est aisément exprimée en Kwh pour l'électricité, en produits pétroliers pour les transports, en charbon, bois gaz pour le chauffage etc, le tout étant convertible en tep sans problème et, d'autre part, la **consommation primaire d'énergie**.

Cette dernière requiert, pour le nucléaire, une convention qui est de considérer la production finale d'électricité et de la convertir en énergie primaire en tenant compte d'un rendement de conversion théorique de 33 %, voisin de celui observé dans les centrales thermiques utilisant des combustibles fossiles. <sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> Comme 1Mwh vaut 0,086 tep, le coefficient de conversion est de  $0,086/0,33 = 0,26$  tep/Mwh..

### Photovoltaïque :

En supposant, qu'indépendamment de l'équipement des toitures, nos contemporains acceptent de voyager à la lumière artificielle, sans profiter des paysages <sup>26</sup>, on peut imaginer couvrir de panneaux photovoltaïques l'emprise des voies ferrées, des autoroutes et des routes nationales.

La longueur totale de ces réseaux est d'environ 50.000 km et leur emprise moyenne est d'environ 10 ha au km linéaire. Avec un coefficient d'utilisation de 60% par des panneaux solaires, on disposerait ainsi de l'ordre de 300.000 ha de surface utile soit 3.000 km<sup>2</sup>.

En y ajoutant la surface utile des panneaux solaires en toiture, soit 1500 km<sup>2</sup> (voir encadré), on obtiendrait une surface utile de panneaux de 4500 km<sup>2</sup>.

Surface des toitures : pour une population de 65 millions d'individus, constituée de familles de trois personnes et disposant d'un logement de 80 m<sup>2</sup> par famille situé dans un immeuble de trois étages, en moyenne :  
 $65 \cdot 10^6 / 3 * 80 / 3 \sim 5200 \cdot 10^6 \text{ m}^2$  ou 5200 km<sup>2</sup>

Surface utilisable : il s'agit pour l'essentiel de toits à deux pentes, ce qui réduit la surface utilisable théorique à 2600 km<sup>2</sup>.

Mais cette pente n'est pas forcément bien orientée. Par ailleurs, les toits peuvent être en terrasses, végétalisés et, de toute manière comportent des cheminées ou divers obstacles. La surface utilisable estimée ne peut être supérieure à 1500 km<sup>2</sup>.

Certains diront que c'est un manque d'imagination et que, quitte à arracher quelques pieds de vigne, des terrains en pente bien exposés pourraient aussi être équipés.

Supposons que l'on trouve 20.000 emplacements ??? de chacun 25 hectares qui répondent aux conditions favorables d'exposition, on pourrait ajouter ainsi :  $20.000 \times 20 \cdot 10^4 \times 0,6$  (coefficient d'utilisation de la surface par des cellules) =  $300.000 \cdot 10^4 \text{ m}^2$  soit 3000 km<sup>2</sup>.

---

<sup>26</sup> Si l'on tient aux paysages, on peut imaginer, si l'on ne regarde pas à la dépense, de réaliser le revêtement routier avec des panneaux photovoltaïques

En étant très (très) optimiste, on pourrait ainsi disposer d'un total de 7500 km<sup>2</sup> de cellules ayant une productibilité de  $7500 \times 40 \cdot 10^6 = 300 \cdot 10^9$  kwh soit environ 25 Mtep.

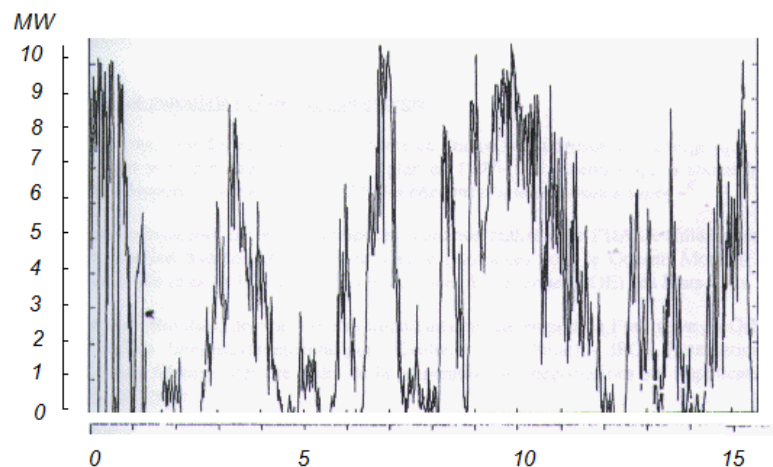
Il faudrait toutefois en stocker la majeure partie avec un rendement de conversion et de reconversion, ce qui réduirait l'énergie finale disponible.

### Eolien :

Les éoliennes atteignent leur puissance maximale pour des vents de 50 kmh. Au-delà, la puissance est limitée pour éviter des contraintes trop importantes. En deçà, la puissance est évidemment inférieure.

Pour connaître l'énergie qu'une éolienne peut délivrer pendant une période de temps donné il faut multiplier la puissance nominale par un coefficient, variable avec le lieu, le régime des vents etc. Pour la France métropolitaine, ce coefficient est inférieur à 2000 pour les éoliennes terrestres et un peu supérieur pour les éoliennes en mer.

Nous retiendrons, par simplification, un coefficient moyen de 2000.



*Exemple de la puissance constatée durant un quart d'heure pour un champ d'éoliennes de 10 MW par un vent permettant d'atteindre la puissance maximale à plusieurs reprises.*

La puissance installée prévue par le "Grenelle de l'environnement" est de 19 GW terrestres et 6 GW en mer à l'horizon 2020.

Cela autoriserait théoriquement une production d'énergie de :

$25 \cdot 10^9 \times 2000 = 50000 \cdot 10^9$  wh, soit environ 4 millions de tep . C'est peu en regard d'une consommation finale d'énergie de 177 Mtep.

Mais il est évident que le "Grenelle" ne prévoit pas, pour 2020, l'équipement de la totalité du potentiel éolien de la France métropolitaine.

Les chiffres concernant ce dernier sont très variables selon les publications. Les valeurs maximales, sont de 40 GW pour l'éolien terrestre (France Energie Eolienne) et 220 GW pour l'éolien maritime (dont 140 GW flottant) selon "Greenunivers".

Notons que les auteurs de ces chiffres soulignent qu'ils sont très théoriques et que de multiples contraintes tendront à les réduire.

Quoi qu'il en soit, l'énergie maximale produite, selon ces évaluations ultra optimistes serait de :

$260.10^9 \times 2000 = 520.000.10^9$  wh ou environ 45 millions de tep, dont il faudrait, pour qu'elle soit utilisable, stocker la majeure partie. Ce qui revient à dire, le stockage ne pouvant conduire qu'à des transformations d'énergie ayant chacune un rendement, que l'énergie contributive à la consommation finale se trouverait réduite considérablement.

#### Le solaire thermique :

Il faut entendre par là le solaire utilisé comme source de chaleur. Avec l'avantage que la chaleur peut se stocker sur des durées raisonnables sans pertes excessives. Pourvu que les réservoirs de stockage du liquide caloporteur soient correctement calorifugés et aient une capacité suffisante pour une desserte de la consommation pour quelques jours sans soleil.

Il est d'usage de considérer, d'une part, le solaire thermique à basse température, capable, par exemple, d'assurer la production d'eau chaude domestique ou encore d'assurer le chauffage des habitations par des planchers chauffants où circule le fluide caloporteur. Et, d'autre part, le solaire thermique à haute température.

Ce dernier concernant, pour l'essentiel, les centrales solaires.

Les centrales solaires sont des centrales thermiques et comme dans toute centrale thermique c'est la vapeur, à une température comprise entre 250 et 500°C, qui entraîne turbines et alternateurs.

La spécificité est que la vapeur est produite directement ou indirectement par des chaudières solaires (Le fluide chauffé dans la chaudière peut être constitué par des sels fondus dont la température peut s'élever jusqu'à 500°C). Pour atteindre les températures requises, il faut concentrer le

rayonnement solaire vers la chaudière en utilisant des miroirs plans, cylindriques ou paraboliques. Ci après, deux exemples :



*La centrale Shams 1 a été démarrée en mars 2013 aux Emirats Arabes Unis. Un caloporteur porté à 393°C, permet de développer, avec 285 000 miroirs paraboliques et 768 concentrateurs solaires tubulaires situés à leur foyer, une puissance de 100 MW pour une surface occupée de 2,5 km<sup>2</sup>.*



*Centrale à tour de 125 MW construite par AREVA au Radjasthan (surface occupée 1,2 km<sup>2</sup>). (les miroirs concentrent l'énergie solaire sur un réservoir situé en haut de la tour et empli d'un liquide caloporteur, par exemple des sels fondus).*

Si l'on retient, pour une installation en France, la valeur plus intéressante de la centrale indienne, soit environ 100 MW au km<sup>2</sup>. La productibilité par km<sup>2</sup> serait de  $100 \cdot 10^6 \times 2000 = 200 \cdot 10^9$  wh annuels par km<sup>2</sup>, si l'énergie est utilisée sous forme de chaleur et de  $200 \cdot 10^9 \times 0.6 = 120 \cdot 10^9$  wh si l'énergie est convertie en électricité.

Remarquons, tout d'abord, que la productibilité, par unité de surface, d'une centrale électrique solaire est meilleure que celle du photovoltaïque. Ce qui ne saurait nous étonner, en raison du faible rendement des cellules photovoltaïques. Remarquons, ensuite, qu'il y a intérêt à les utiliser comme source de chaleur. Remarquons, enfin, que la situation la plus intéressante de ces centrales est celle des déserts chauds où l'on dispose tout à la fois de surface et d'un grand nombre d'heures d'ensoleillement annuel.

Cette dernière implantation suppose, toutefois, que l'on puisse transporter l'énergie produite (par exemple sous forme d'hydrogène) car, par définition, les déserts ne sont pas les lieux où l'on a besoin d'énergie.

Alors, en attendant, supposons que l'on équipe, en France, la surface de la Crau (600 km<sup>2</sup>) et celle du camp de Canjuers (350 Km<sup>2</sup>)<sup>27</sup> ou, si vous trouvez que ce n'est pas réaliste, une surface équivalente. En l'étendant à 1000 km<sup>2</sup>, la productibilité annuelle serait de  $1000 \times 80 \cdot 10^9$  wh soit 80 Twh ou environ 7 Mtep.

En revanche, l'utilisation de capteurs plans, pour les besoins domestiques d'eau chaude et le chauffage, pourrait être plus productive ce qui ferait sans doute plaisir à nos concitoyens, soucieux d'écologie.

Mais l'utilisation de ces capteurs plans ne se justifie réellement qu'au Sud de la Loire, ce qui ne concerne que 40% des français. En faisant l'hypothèse que la migration vers le Sud, ensoleillé 2500 heures par an, amène à y regrouper 50 % des français et que chacun de ceux-ci puisse disposer en moyenne de 10 m<sup>2</sup> de capteurs plans (pourquoi ne pas être optimiste et même très optimiste) la productibilité pourrait atteindre :

$$300 \times 10 \times 2500 \times 35 \cdot 10^6 \times 0,8 \text{ (rendement)} / 11670 = \text{environ } 18 \text{ Mtep.}$$

---

<sup>27</sup> en réalité la partie à peu près plane "le grand plan de Canjuers" a une surface d'une vingtaine de km<sup>2</sup>.



## Biomasse :

Les cultures énergétiques destinées à la production de biocarburants ont un rendement très faible et, utilisant des terres agricoles, sont très critiquables et d'ailleurs très critiquées.

En revanche la filière bois qui constitue aussi, comme vous l'avez noté précédemment, un stockage de l'énergie solaire et ne nécessite pas d'énergie supplétive fait l'objet d'un large consensus.

L'exploitation, non destructrice, d'une forêt autorise une production équivalente à 1,6 à 4 tep<sup>28</sup> par hectare et par an. La forêt française qui, contrairement à ce que croient certains n'est pas en régression, occupe 14 millions d'hectares. Sa productibilité est donc de 22 à 56 Mtep /an. Il convient évidemment d'en déduire l'énergie dépensée pour la récolte, le transport et pour la transformation en copeaux ou granulés.

Il convient également de prendre en considération la demande de matériaux de construction (notamment l'engouement pour les maisons en bois vivement encouragé par certains), la demande de la chimie et de la pharmacie bio-sourcées qui auront besoin de remplacer les molécules que leur fournit actuellement le pétrole, sans parler des besoins de pâte à papier ...

Comme il convient de remplacer des combustibles fossiles nous retiendrons que la productibilité espérée de la forêt française permettrait de remplacer 30 Mtep an fournis actuellement, pour le chauffage<sup>29</sup>, par le fuel, le gaz ou le charbon.

Oui, me direz-vous, mais il y a aussi la valorisation des déchets organiques, voire des déchets tout court.

S'agissant des déchets de cultures et des déjections animales, Le monde agricole a derrière lui une longue tradition d'utilisations de ces déchets. Mais les pratiques ont évolué, les élevages se sont concentrés. La

---

<sup>28</sup> 4l tep en exploitant les taillis, houppiers, éclaircies.(une tep ou tonne d'équivalent pétrole vaut 11670 Kwh)

<sup>29</sup> Si l'énergie "bois" était convertie en électricité l'énergie disponible se réduirait à 10 Mtep

méthanisation de certains déchets organiques non utilisés par l'épandage est envisageable.

Par ailleurs l'incinération des déchets ménagers avec cogénération peut encore être étendue.

Cependant les productions supplémentaires d'énergie ne peuvent être que marginales.

### Hydroélectricité

L'hydroélectricité est produite par gravité dans des centrales dites de "basse chute" (par exemple au fil de l'eau sur le Rhin et le Rhône), dans des centrales de chutes moyennes ou hautes, alimentées ou non par des réservoirs (Naturels ou constitués de retenues par barrages) et dans des usines marémotrices.

Depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle (la houille blanche), le potentiel français a été largement équipé. Des améliorations, telles que le projet "Romanche" consistant à remplacer six centrales anciennes se succédant le long de la moyenne vallée de la Romanche par une seule centrale moderne, sont encore possibles, mais le potentiel est faible.

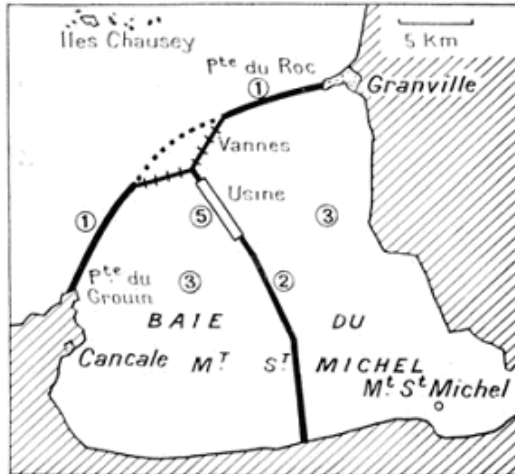
Une étude réalisée, région par région, en novembre 2013 <sup>30</sup> relève un potentiel, microcentrales comprises, de 9000 Gwh pouvant être équipé.

Ce potentiel de 0,8 Mtep est faible, comme l'on pouvait s'y attendre, mais ne fait pas état du projet de la baie du Mont Saint Michel. Ce dernier fait pourtant l'objet d'études d'impacts environnementaux par l'Institut Polytechnique de Grenoble.

Mais c'est un sujet sensible, qui comporte de nombreux opposants déclarés a priori.

---

<sup>30</sup> par la Direction Générale de l'Energie et du Climat (DGEC), la Direction de l'Eau et de la Biodiversité (DEB), les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) et les producteurs (fédérés autour de l'Union Française de l'Electricité (UFE).



*Le barrage aurait une longueur de 22 km (sensiblement la longueur du barrage du Zuidersee).*

*La baie serait divisée en deux bassins se déversant alternativement l'un dans l'autre*

La production ne serait d'ailleurs que de 13 milliards de kwh par an, soit un peu plus de 1 Mtep.

Si le potentiel de production hydroélectrique est faible, la production actuelle est précieuse pour la gestion du réseau, en autorisant notamment la réponse aux pointes de la demande.

### Energie Géothermique

Le potentiel estimé (notamment à partir de forages profonds) est de 2700 MW électriques. Il faut toutefois considérer qu'il s'agit d'énergie à basse température utilisable exclusivement pour le chauffage. Mais restons optimistes et admettons qu'il s'agit bien d'une puissance nette de 2700 MW. Cette puissance est disponible en continu et la production annuelle pourrait donc être de  $2,4 \cdot 10^6$  Mwh, soit 2,4 Twh ou environ 2 Mtep..

### Récapitulons :

Cf. tableau ci-après :

Comparaison entre l'énergie primaire actuellement consommée et le potentiel d'énergies renouvelables, estimé dans ce qui précède.

En Mtep	Actuel (2012)	Potentiel estimé	
Photovoltaïque	0,4	25	
eolien	1,3	45	
Solaire thermique	0,1	25	
Biomasse	10 + 2,4	25	
Déchets	1 + 0,4 + 0,4	3,6	
hydroélectricité	5,3	7	
Géothermie + pompes à chaleur	1,4	2	
Total renouvelable	<b>22,7</b>	<b>133</b>	
nucléaire	111	?	
Combustibles fossiles	129,6	ε	
Consommation primaire totale	<b>265</b>	?	

## Surgénération

L'uranium, comme la plupart des éléments naturels, est un mélange d'isotopes <sup>31</sup> : l'uranium 235 et l'uranium 238.

Malheureusement, seul l'uranium 235 est un combustible nucléaire utilisable dans les réacteurs actuels et ce qui aggrave la situation : l'uranium naturel ne contient que 0.7% d'uranium 235.

Si l'on se limitait à sa seule utilisation, la réserve économiquement accessible, exprimée en tep, serait sensiblement équivalente à celle du pétrole. C'est ce qui fait dire à certains que le nucléaire n'est qu'une énergie de transition.

On se trouve, en quelque sorte, dans la situation d'un trappeur du grand Nord canadien qui campe au milieu d'une forêt qui abonde en bois mort que son humidité rend malheureusement incombustible sauf une petite partie, constituée de bois sec.

Mais notre trappeur, ne manque pas de bon sens et fera sécher une partie du bois humide en le disposant autour de son foyer. Il obtiendra de cette manière un peu plus d'un kilogramme de bois sec pour chaque kilogramme de bois brûlé. Sa réserve de bois sec sera ainsi étendue à la totalité du bois humide de la forêt.

Transposons cette historiette au cas de l'uranium. Imaginons que le bois sec soit l'uranium 235 et le bois humide l'uranium 238. Il suffirait de rendre l'uranium 238 combustible (au sens nucléaire

---

<sup>31</sup> Les isotopes d'un même élément ont, tous, les mêmes propriétés chimiques, leurs atomes comportent donc le même nuage d'électrons et leurs noyaux un nombre égal de protons. Mais, dans ces noyaux, le nombre de neutrons diffère.

Le nombre total de nucléons (protons + neutrons) est caractéristique d'un isotope donné et constitue en quelque sorte sa carte d'identité.

L'uranium naturel est ainsi constitué d'un mélange de deux isotopes, leurs cartes d'identité sont "*uranium 235*" et "*uranium 238*". Chacun d'eux possède 92 protons, mais le noyau de l'uranium 235 contient 143 neutrons, alors que celui de l'uranium 238 en possède 146.

du terme, c'est-à-dire fissile <sup>32</sup>). Ceci est possible en faisant capturer un neutron par un noyau d'U238 qui se transforme alors en plutonium **fissile**.

Cette réaction se produit dans les réacteurs actuels. Une partie du plutonium formé brûle et participe à la production d'énergie. La part de plutonium non brûlé est recyclée dans les combustibles MOX <sup>33</sup>. On a donc ainsi augmenté la quantité d'uranium utile.

Mais les réacteurs actuels utilisent des neutrons ralentis, ce qui limite la probabilité de capture d'un neutron par un noyau d'uranium 238.

La probabilité de conversion serait en revanche considérablement augmentée dans un réacteur à neutrons rapides tel que Superphénix <sup>34</sup>.

On aurait ainsi la possibilité de convertir tout l'uranium 238 en combustible, par plutonium interposé.

Les réacteurs capables de cette conversion sont des surgénérateurs.

Avec la surgénération, la totalité de l'uranium naturel peut servir de combustible. Cela centuple la réserve de combustible nucléaire.

L'intérêt de la surgénération ne s'arrête pas là. Pour un prix de revient inchangé du Kwh produit, le coût d'extraction économiquement acceptable peut alors être également centuplé. La

---

<sup>32</sup> Lorsqu'un neutron supplémentaire est capturé par un noyau d'uranium 235 ce noyau devient instable, il se divise alors brutalement en deux fragments. Cette division brutale s'accompagne de la libération de 2 ou 3 neutrons et d'une grande quantité d'énergie. C'est la "*fission*". Les neutrons libérés, s'ils ne sont pas absorbés, peuvent à leur tour produire d'autres fissions et ainsi de suite... C'est la "*réaction en chaîne*". C'est la réaction en chaîne contrôlée qui permet la production d'énergie en continu dans un réacteur nucléaire.

<sup>33</sup> MOX pour mélange d'oxydes d'uranium 238 et de plutonium

<sup>34</sup> Arrêté en 1997, par une décision politique faisant suite à un engagement d'alliance électorale, sans débat à l'Assemblée Nationale.

quantité d'uranium économiquement accessible va donc augmenter considérablement. <sup>35</sup>

Il n'est donc pas nécessaire d'attendre la "**fusion**" dont la date d'industrialisation est indéterminée <sup>36</sup> pour croire à l'avenir de l'énergie nucléaire.

D'autant plus que les réacteurs à neutrons rapides <sup>37</sup> autoriseraient l'utilisation du thorium dont les réserves sont bien supérieures à celles de l'uranium.

Cerise sur le gâteau, les réacteurs à neutrons rapides pourront être beaucoup plus sûrs et permettre la transmutation (l'incinération) de certains éléments radioactifs, simplifiant ainsi sérieusement la gestion des déchets (Cf. annexe 4)

Ces réacteurs, dits de 4<sup>ème</sup> génération, font l'objet d'un accord de recherche au niveau mondial auquel participent : Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, Corée du Sud, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse, USA et l'Union Européenne. <sup>38</sup>

Le principe d'un réacteur sûr a été présenté par Carlos Rubbia. Il prévoit qu'une partie des neutrons nécessaires à l'entretien de la réaction en chaîne soit fournie de l'extérieur. Par exemple, par l'impact sur des noyaux de plomb de protons de très haute énergie obtenus dans un accélérateur de protons.

On associe donc un accélérateur de protons et un réacteur nucléaire. Ce dernier ne peut fonctionner sans le secours de l'accélérateur. Tout incident extérieur arrête alors le réacteur qui présente donc une sécurité nucléaire totale.

---

<sup>35</sup> Les océans contiennent trois milliards de tonnes d'uranium.

<sup>36</sup> Dont la faisabilité industrielle reste encore à démontrer, ce que se propose de faire ITER, en construction à Cadarache.

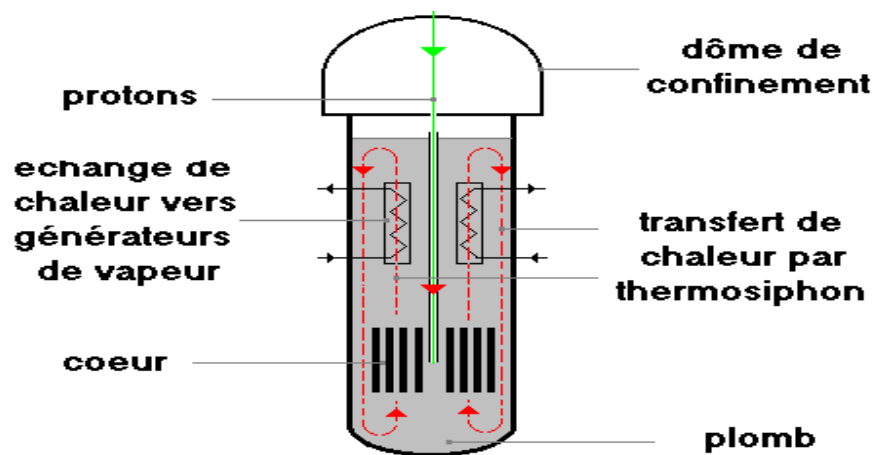
<sup>37</sup> (Dans lesquels les neutrons ne sont pas ralentis par l'eau ou le graphite).

<sup>38</sup> La Chine vient de mettre en service son premier réacteur nucléaire à neutrons rapides, dit « de quatrième génération », une technologie permettant à la fois de réduire la consommation d'uranium et de diminuer la durée d'activité des déchets radioactifs.

Il existe d'autres projets de réacteurs à neutrons rapides (non ralentis), par exemple des réacteurs à sels fondus utilisés à la fois comme combustible et comme caloporteur.

Tous peuvent servir d'incinérateurs pour le plutonium et les éléments transuraniens.

### Principe du projet de C. Rubbia



*Le faisceau de protons provoque l'éclatement des noyaux de plomb à l'intérieur du cœur, en produisant les neutrons complémentaires nécessaires.*



## Les déchets nucléaires

Si les problèmes posés par les stocks militaires et les résidus des utilisations médicales et industrielles ne peuvent être ni oubliés ni négligés, l'objet des débats concerne essentiellement les déchets radioactifs produits tout au long de la filière électronucléaire et plus particulièrement les combustibles usés <sup>39</sup>.

Ceux-ci contiennent de l'uranium 238, comme le combustible de départ, de l'uranium 235 résiduel, du plutonium 239 et, bien évidemment, les produits résultant de la fission (Césium 131 et 137, Technétium 99, Zirconium 93, palladium 107, iode 139 etc. ... ) ainsi que des transuraniens : neptunium, américium et curium.

Avec comme composition typique pour 100 kilogrammes :

U <sub>238</sub>	94	kg
U <sub>235</sub>	1	kg
Plutonium	1	kg
Produits de fission	3,4	kg
Transuraniens	0,1	kg

Ces déchets ont des "durées de vie" très variables, par exemple 30 ans pour le Césium 137, 24000 ans pour le plutonium 239 et 4 millions d'années pour l'uranium 238 <sup>40</sup>.

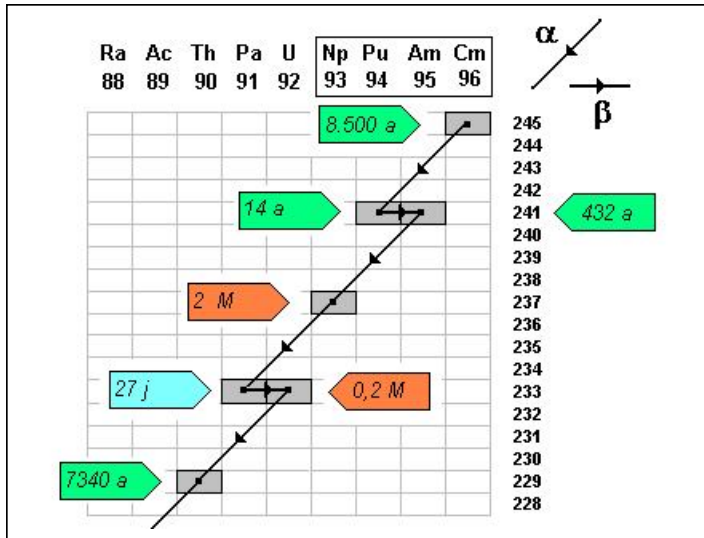
Ces durées de vie se compliquent du fait que des isotopes radioactifs à vie courte peuvent conduire à des isotopes à vie longue (et réciproquement).

C'est ce qu'illustre le tableau ci-après, en partant du curium :

---

<sup>39</sup> Le combustible de départ est constitué d'U<sub>238</sub>, enrichi en U<sub>235</sub> (3 à 5 %) et éventuellement en plutonium (cas du MOX).

<sup>40</sup> Ce qui explique que l'on puisse encore trouver ce produit naturel, très faiblement radioactif.



*J = jour*  
*a = année*  
*M = million d'années*

Les produits de fission ont un avenir moins complexe dans la mesure où leur désintégration conduit le plus souvent, à un isotope stable (non radioactif).

Nous sommes donc confrontés à un double problème celui des déchets à vie courte, donc fortement radioactifs et celui des déchets à vie longue, donc faiblement radioactifs. En ajoutant qu'un certain nombre de ces éléments sont recyclables ou incinérables (par désintégration provoquée et non plus spontanée comme dans le tableau qui précède).

Quels dangers présentent ces déchets ?

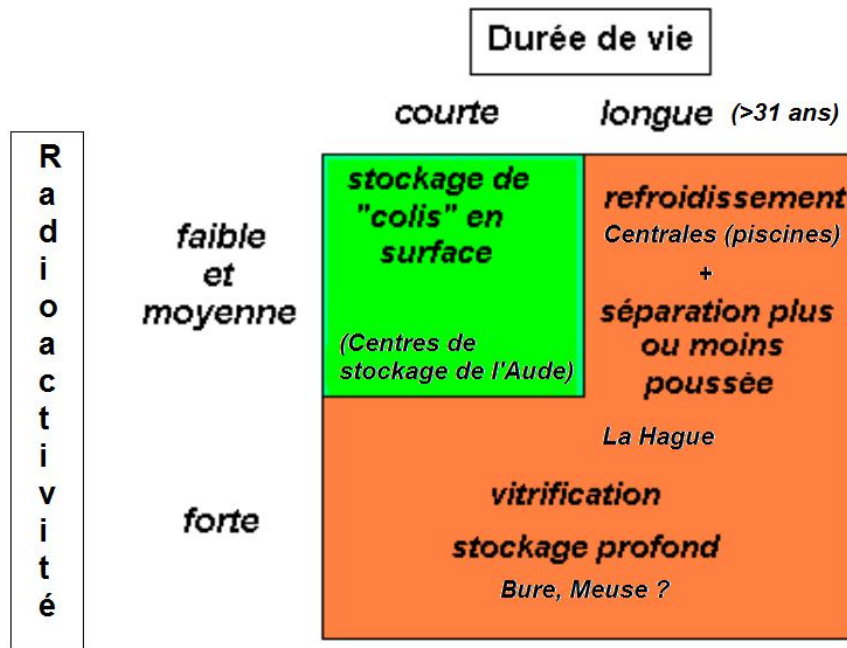
Les produits radioactifs émettent des rayonnements ionisants. Lorsque la source est extérieure à l'organisme humain (irradiation) il est aisé de s'en protéger. Par exemple comme le font les opérateurs de radiologie en interposant un écran (généralement constitué par un verre au plomb).

Mais si les produits radioactifs ont été inhalés ou ingérés la source devient interne. C'est là le véritable danger.

IL faut donc, comme pour les déchets toxiques (cadmium, plomb, molécules organiques cancérigènes, pesticides...) éviter la dispersion dans le milieu naturel.

Ce n'est pas un problème insoluble. Il est d'ailleurs facilité par le fait que les déchets radioactifs sont contrôlés à la source et non dispersés comme les déchets toxiques.

Les solutions de gestion mises en œuvre sont schématisées dans le tableau ci-après :



Les déchets à faible activité et vie courte (déchets Hospitaliers, outillages, matériels usagés, gravats des centrales ...) et les déchets de faible activité à vie longue (après mise en conteneurs métalliques emplis de béton) sont entreposés en surface dans les Centres de stockage de l'Aude gérés par l'Andra, que le public peut visiter.

Pour les déchets à vie longue de forte activité (essentiellement les combustibles usés), un refroidissement préalable à tout traitement est indispensable pendant un certain nombre d'années. Il s'effectue, le plus souvent, dans des piscines situées près des centrales.

Les combustibles usés, refroidis, peuvent être retraités pour recyclage (par exemple, pour la production des combustibles MOX).

Les éléments non recyclables sont vitrifiés par dispersion dans une matrice de composition voisine de l'obsidienne coulée dans des fûts en acier soudés hermétiquement. L'obsidienne est un verre d'origine naturelle. Sa résistance à l'eau est bien établie, comme le prouve l'état de conservation des outillages préhistoriques et pointes de flèches taillées dans l'obsidienne, il y a des dizaines de milliers d'années.

Les éléments vitrifiés sont destinés à être entreposés dans un stockage profond (plus de 500 m) dont la nature géologique doit éviter toute dispersion, par l'eau notamment. Cet entraînement est en effet possible comme le prouve la radioactivité de la plupart des eaux minérales.

Pour éviter la migration vers les nappes phréatiques, il faut que les formations géologiques envisagées pour le stockage profond soient imperméables à l'eau de manière durable. Les gisements de sel, les argiles plastiques et certaines formations granitiques répondent à ce critère. Si un gisement de sel existe depuis des millions d'années c'est évidemment parce qu'il est à l'abri de toute circulation d'eau.

L'opposition au stockage profond ne semble pas rationnellement fondée. Les structures géologiques envisagées sont stables depuis des millions d'années. Les gisements de sel, tout comme la forêt enfouie de Monte Castriffi dont le bois est resté intact dans l'argile depuis plus d'un million d'années, prouvent que certaines structures géologiques peuvent être à l'abri de l'eau. De nombreux exemples montrent par ailleurs que les formations géologiques peuvent assurer le confinement des produits radioactifs. C'est notamment le cas à Cigar Lake au Canada dont le gisement d'uranium n'a pas laissé migré sa radioactivité depuis plus d'un milliard d'années, c'est aussi le cas à OKLO au Gabon. A OKLO, il y a près de 2 milliards d'années, des réactions en chaîne se sont développées grâce à la teneur élevée des minerais en uranium (des réacteurs naturels ont fonctionné), les produits de fission sont restés sur place sans subir de migration.

Il suffit donc de choisir les bons sites.

Les laboratoires souterrains ont justement cet objectif, ils doivent permettre de s'assurer que les sites envisagés offrent, comme les sites que nous venons de citer, les meilleures garanties contre les infiltrations d'eau.

L'alternative est de transformer les déchets radioactifs à vie longue en déchets à vie courte par transmutation. La transmutation est la transformation d'un noyau atomique en un autre, que cette transformation soit spontanée, comme dans la radioactivité, ou non. Le résultat de cette transmutation peut être un autre noyau radioactif ou un noyau stable.

Un bon exemple de la transformation en noyau stable est celle du technétium 99. Le technétium 99 constitue environ 10 % des produits de la fission de l'uranium 235, il a une période de 200.000 ans. Soumis à un flux de neutrons, il se transforme en technétium 100, dont la période est de 16 secondes, qui se convertit spontanément en ruthénium 100 qui est un noyau stable, donc non radioactif.

Ceci est possible dans les réacteurs à neutrons rapides (4<sup>ème</sup> génération) comme le montre le réacteur expérimental Franco Belge Guinevere installé à MOL et comme le prouve journallement le combustible MOX utilisé par 29 centrales françaises.