

# Pour un Grenelle adressant la gestion des Ressources finies

Richard RUTILY

Avril 2012

## Présentation

*Le terme de Grenelle désigne, par référence aux accords de Grenelle de mai 68, l'organisation d'une consultation, sur un sujet majeur, menée avec la participation de représentants du gouvernement, de l'opposition, de différentes organisations civiles. Le but est d'orienter la politique sur une base la plus consensuelle possible après avoir examiné toutes les possibilités et avoir entendu tous les arguments et contre arguments.*

*Le plaidoyer pour un Grenelle adressant la gestion des ressources finies vise à recentrer le débat qui a eu lieu lors du Grenelle pour l'environnement, sur des actions à plus court terme, qui sont nécessaires pour permettre au Grenelle pour l'environnement de déployer tous ses effets.*

*Parmi les ressources finies il y a l'énergie qui est un thème commun avec ceux du Grenelle de l'environnement, et dans ce thème là, il y a les carburants liquides qu'il faut traiter dans l'urgence puisque leur déplétion est sur le point de commencer. C'est un exemple de point qui n'était pas à l'ordre du jour du Grenelle de l'environnement.*

*Un débat serait organisé, via des groupes de travail rassemblant chacun des membres répartis en plusieurs collèges. Chaque collège aurait pour vocation de représenter les acteurs du domaine : l'État, les collectivités locales, les ONG, les employeurs et les salariés.*

*Chaque groupe prendrait en charge une grande question qui serait traitée dans des ateliers aux objectifs plus limités mais de telles sortes que l'ensemble des ateliers recouvre complètement la problématique de la grande question.*

*Il serait également possible de créer des ateliers intergroupes pour adresser les problématiques transverses.*

*Dans chaque atelier il y aurait une phase de création d'idées qui consiste à proposer des actions qui adressent le problème que l'on veut résoudre. Comme dans toutes phase de créativité, toutes les idées sont acceptées et mises dans l'ensemble des idées de l'atelier avec pour but de favoriser des idées nouvelles chez les participants du groupe, soit par amélioration, soit par analogie, soit par contradiction ou par tout autre procédé.*

*Ensuite il faudrait enchaîner sur une phase de reformulation. Elle consisterait à examiner devant l'atelier au complet toutes les propositions dans le but d'obtenir un consensus : dans cette phase on peut regrouper des propositions, en éliminer, tenir compte des avis opposés en listant les cas où la proposition ne s'applique pas etc. L'important est d'obtenir un consensus quelque soit l'approche pour ce faire.*

*Enfin on classerait les propositions en les examinant deux par deux pour répondre à la question suivante : Est-ce que la proposition A est plus facile à réaliser si on fait l'hypothèse que la proposition B a déjà été réalisée ? Cet examen permettrait de décider dans quel ordre les deux*

*propositions doivent être implémentées et la réunion de toutes ces priorités élémentaires permet de produire un plan d'action.*

*Dans ce livre on suivra un peu le même processus mais sans avoir la richesse des propositions que permet la créativité d'un groupe, ni la robustesse qui est une conséquence de la phase de reformulation. Il s'agit donc d'une ébauche de ce qu'il faudrait faire qui permet de se faire une idée de l'intérêt du résultat attendu.*

*Les grandes questions qui seraient traitées dans des groupes pourraient être :*

- 1. L'énergie*
- 2. Les minerais classiques*
- 3. Les terres rares*
- 4. L'agriculture et la pêche*
- 5. La pollution et les déchets*
- 6. Le développement industriel*
- 7. Le développement des services*
- 8. La population*

*Pour chacun de ces grands domaines, nous ferons dans ce livre une présentation, puis nous proposerons des mesures pour améliorer la pérennité du domaine, nous examinerons les objections les plus probables à ces propositions afin de tenter une reformulation qui ait des chances de satisfaire le plus grand nombre et nous terminerons par un plan d'action.*

## *Sommaire*

<b>PRÉSENTATION .....</b>	<b>2</b>
<b>L'ÉNERGIE .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
<b>DÉFINITION .....</b>	<b>7</b>
<b>LA DISPONIBILITÉ DE L'ÉNERGIE .....</b>	<b>8</b>
<b>LES EFFETS ÉCONOMIQUES DE L'ÉNERGIE.....</b>	<b>11</b>
<b>UN MODÈLE ÉCONOMIQUE QUI DONNE UNE PLACE À L'ÉNERGIE.....</b>	<b>11</b>
<b>L'ÉVOLUTION DE L'ÉCONOMIE AVEC L'ÉNERGIE .....</b>	<b>15</b>
<b>LA TAXE CARBONE .....</b>	<b>18</b>
<b>LA POLITIQUE FISCALE ET LE PÉTROLE .....</b>	<b>18</b>
<b>LE PÉTROLE .....</b>	<b>22</b>
<b>LA PÉNURIE QUI S'ANNONCE .....</b>	<b>23</b>
<b>LA GÉOPOLITIQUE DU PÉTROLE .....</b>	<b>24</b>
<b>LE GAZ.....</b>	<b>25</b>
<b>LA GÉOPOLITIQUE DU GAZ .....</b>	<b>25</b>
<b>LA LOI EXPONENTIELLE .....</b>	<b>27</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>28</b>
<b>L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.....</b>	<b>29</b>
<b>LE CHARBON ET LE GAZ.....</b>	<b>29</b>
<b>LE NUCLÉAIRE .....</b>	<b>29</b>
<b>L'HYDRAULIQUE.....</b>	<b>30</b>
<b>LES RENOUEVELABLES.....</b>	<b>30</b>
<b>LES STEPS.....</b>	<b>30</b>
<b>L'ÉLECTRICITÉ EFFAÇABLE.....</b>	<b>32</b>
<b>LES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE .....</b>	<b>33</b>
<b>LES PROPOSITIONS .....</b>	<b>34</b>
<b>LES OBJECTIONS .....</b>	<b>35</b>
<b>CONSTRUCTION D'UNE INSTALLATION POUR RETIRER LE CO<sub>2</sub> DE L'AIR AMBIANT .....</b>	<b>46</b>
<b>CONSTRUCTION D'UNE INSTALLATION POUR ÉLECTROLYSER L'EAU .....</b>	<b>46</b>
<b>LES PROPOSITIONS REFORMULÉES.....</b>	<b>50</b>
<b>LE PLAN D'ACTION .....</b>	<b>53</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>55</b>
<b>REMPLACER LE PARC DE VÉHICULES PARTICULIERS.....</b>	<b>55</b>

## Table des illustrations

Figure 1 : Représentation des réserves d'énergie .....	10
Figure 2 : Représentation des réserves possibles d'énergie .....	10
Figure 3 : Schéma général de l'économie.....	15
Figure 4 : Schéma modifié de l'économie .....	16
Figure 5 : Economie avec ressources.....	17
Figure 6 : Economie avec recyclage des déchets .....	17
Figure 7: Le plateau oscillant de la production de pétrole .....	19
Figure 8 : Phase initiale du plateau oscillant .....	20
Figure 9 : Export Net disponible .....	21
Figure 10 : Progression du PIB Français.....	28
Figure 11 le STEP de Grand'Maison.....	31
Figure 12 : Le principe des barrages appliqués en mer .....	32
Figure 13 : Consommation électrique en France (semaine typique) en hiver .....	33
Figure 14: Conséquences des catastrophes industrielles majeures.....	36
Figure 15 : Schéma de principe d'un réacteur hybride .....	43
Figure 16 : Installation pour retirer le CO <sub>2</sub> .....	46
Figure 17 : Installation d'électrolyse .....	47

## Table des tableaux

Tableau 1 : Table de conversion des énergies.....	8
Tableau 2 : Réserves d'énergie encore disponibles .....	9
Tableau 3 : Travailleur pétroliers PIB par tête.....	13
Tableau 4 : Travailleurs énergétiques PIB par tête .....	14
Tableau 5 : Efficacité du stockage d'énergie .....	22
Tableau 6 : Efficacité tenant compte des rendements .....	22
Tableau 7: Dangerosité de la production d'électricité .....	37
Tableau 8 Propositions reformulées .....	52

## L'énergie

### *Introduction*

La nature a une façon un peu brutale de maintenir l'équilibre dans un système écologique. L'instinct de reproduction de chaque espèce l'amène normalement à croître, et la régulation se fait par des prédateurs. Si une espèce a un peu trop de succès, les prédateurs correspondants se multiplient jusqu'à ce qu'un équilibre se fasse. Et si ce sont les prédateurs qui ont un peu trop de succès, ils provoquent eux même la pénurie de proies et disparaissent peu de temps après l'espèce qu'ils ont décimée.

L'espèce humaine, depuis l'industrialisation, a un peu trop de succès. On est les prédateurs de la Terre entière, la nature va-t-elle se charger de nous faire disparaître ?

On a engagé une lutte, on a remplacé des espèces sauvages par des espèces domestiquées, on a créé un monde artificiel qui correspond mieux à nos besoins du point de vue du confort et de l'espérance de vie. Tout cela on a pu le faire parce qu'on a réussi à maîtriser l'énergie qui a multiplié notre capacité d'action.

Notre prédation s'est déplacée. Elle ne s'exerce plus sur des espèces animales où des plantes, elle s'exerce sur les ressources finies : énergie et minerais.

Il y a des gens, sérieux et réfléchis, malthusien en général, qui pense que l'on doit arrêter, que cette aventure n'est pas raisonnable. Et puis il y a des gens un peu fous qui veulent continuer, car ils apprécient de ne pas mourir brutalement, de manger à leur faim et toutes choses futiles du même genre.

Alors je suis un peu fou et j'ai cherché comment continuer un peu, du genre 100 ou 200 ans, car j'espère bien qu'un autre fou se lèvera pour nous trouver une autre prolongation lorsque le moment sera venu.

De toutes les ressources naturelles que nous utilisons, l'énergie est celle qui a l'impact le plus important sur notre mode de vie. Et parmi les énergies que nous utilisons le pétrole est encore plus primordial que toutes les autres. Or la première pénurie à laquelle nous devons faire face est une pénurie du pétrole.

Ces faits expliquent les priorités qui sont proposées dans cette partie. On traite d'abord les urgences , puis on traite les besoins.

### *Définition*

L'énergie est une grandeur qui caractérise le changement d'état d'un système, elle représente la capacité d'un système ou d'un corps à modifier son état ou celui d'un autre système, pour produire un travail, de la chaleur, de la lumière ou du mouvement. Les activités qui impliquent une utilisation de l'énergie sont multiples et comportent toutes des modifications de température, ou de vitesse, de forme, de composition chimique, de composition nucléaire ou des interactions avec des champs comme par exemple les champs électromagnétiques ou gravitationnels.

L'énergie est donc une grandeur physique qui obéit à un certain nombre de lois qui ne sont pas sujettes à discussion et qu'on ne peut ignorer.

Du point de vue de l'activité économique, l'énergie est ce qui mesure la transformation du monde qui nous entoure. Cette mesure par l'énergie est bien plus pertinente que les mesures en unités monétaires, car fondée sur les lois de la physique qui sont intangibles alors que les unités monétaires ne sont pas indépendantes des conventions humaines et des dévaluations. Pour produire les objets dont on a besoin, il nous faut partir des ressources naturelles et les transformer en utilisant de l'énergie afin de les rendre aptes à remplir nos besoins. En conséquence utiliser de l'énergie et transformer le monde sont deux façons synonymes de s'exprimer.

Les données économiques que l'on utilisera expriment l'énergie dans des unités variées. Lorsque nécessaire nous utiliserons la table suivante de conversion des énergies pour exprimer les données que l'on veut comparer dans la même unité.

Conversion	1 kWh	1 GJ	1 therm	1 MBtu	1 m3 de gaz	1 bep	1 tep	1 tec
<b>1 kilowatt heure kWh</b>	1	0.0036	0.0342	0.0034	0.0949	0.00059	0.00008	0.000125
<b>1 Gigajoule GJ</b>	277.5	1	9.5	0.95	26.3	0.1634	0.022	0.03467
<b>1 therm</b>	29.27	0.10545	1	0.1	2.78	0.0172	0.0023	0.00365
<b>1 million de Btu MBtu</b>	292.7	1.054	10	1	27.8	0.172	0.0232	0.0365
<b>1 mètre cube de gaz m3</b>	10.54	0.038	0.36	0.036	1	0.0064	0.00087	0.00136
<b>1 baril équivalent pétrole bep</b>	1700	6.12	58.14	5.814	155.5	1	0.135	0.2122
<b>1 tonne équivalent pétrole tep</b>	12602	45.37	431	43.1	1153	7.4	1	1.573
<b>1 tonne équivalent charbon tec</b>	8012	28.84	274	27.4	733	4.71	0.6357	1

**Tableau 1 : Table de conversion des énergies**

### ***La disponibilité de l'énergie***

Le dernier siècle a vu une utilisation de plus en plus importantes des ressources énergétiques disponibles et une consommation d'une part importantes des énergies fossiles que la nature a mise à notre disposition.

Il semble bien que le pic de production du pétrole soit arrivé ou soit proche de l'être et c'est sans doute le début d'une séquence d'événements semblables qui se reproduiront pour le gaz et le charbon à brève échéance.

Sachant que les scénarios de référence pour la consommation mondiale de l'énergie prévoient de l'ordre de 16,5 GTEP en 2030, qu'en est-il des réserves d'énergie disponibles ?

Nous les avons rassemblées dans le tableau suivant où le chiffrage des réserves de Gaz, de pétrole, de lignite et sub bitumeux, et de charbon est issu du "BP Statistical Review of World Energy June 2011".

Sources	Réserves en Gtep
Uranium en réacteur à eau	80
Gaz	168,4
Pétrole	169
Lignite et sub-bitumeux	290
Charbon	257
Schistes bitumineux + sables asphaltiques	≈ 500
Hydrates de méthane	> 1000
Uranium en réacteur surgénérateur	11200
Thorium en réacteur surgénérateur	33600
Thorium et uranium faible teneur	Plus de 40000000
Deutérium eau de mer	407588000000

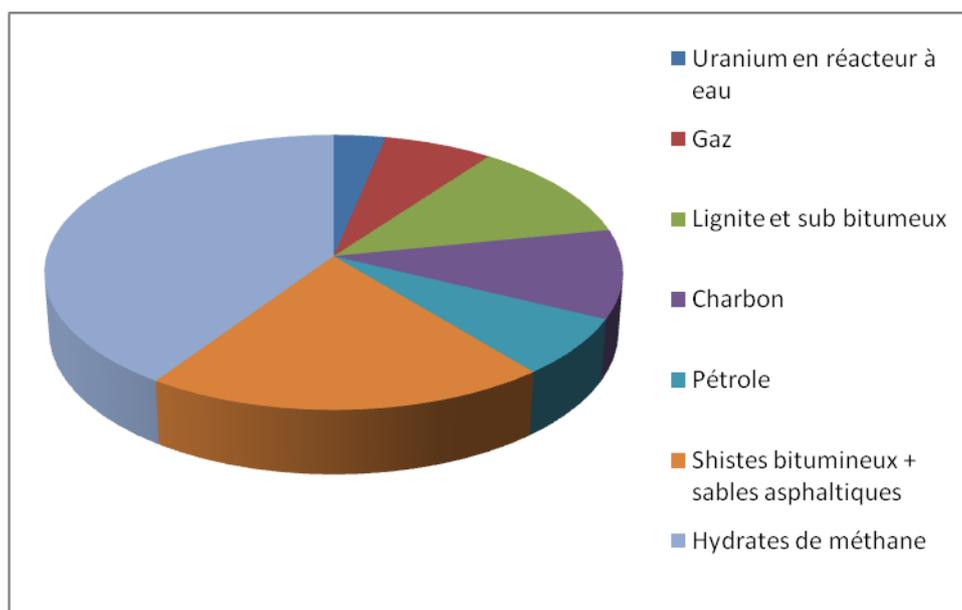
**Tableau 2 : Réserves d'énergie encore disponibles**

Certaines lignes du tableau demandent quelques explications : l'uranium a un contenu énergétique qui dépend de la technique utilisée pour l'exploiter. De même la valeur économique du minerai augmente lorsque la technique progresse ce qui permet de rentabiliser des gisements avec une teneur pauvre en uranium :

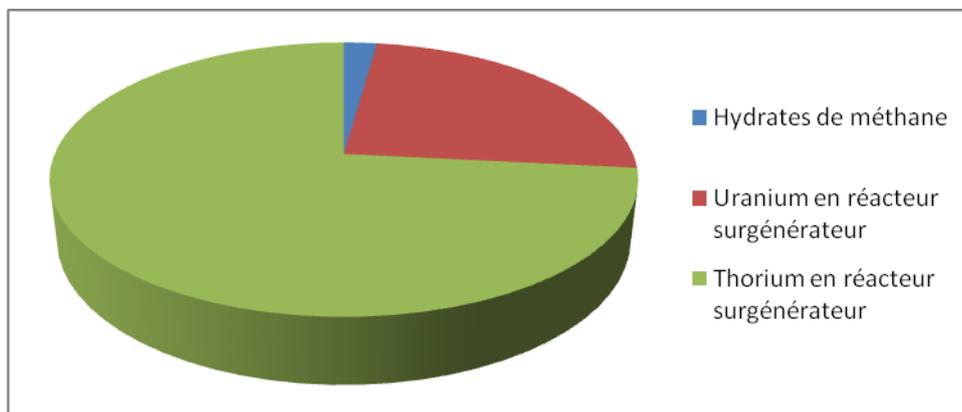
- Utilisés dans des centrales classiques l'uranium contenu dans les minerais ayant une teneur supérieur à 1 kg par tonne correspond approximativement à la moitié de l'énergie contenu dans le pétrole encore récupérable avec les techniques actuelles.
- Utilisé dans des surgénérateurs il faut multiplier cette quantité par 140. Si on utilise le thorium également dans les surgénérateurs on multiplie encore par 4 l'énergie disponible (3 pour le thorium et 1 pour l'uranium) ce qui fait 280 fois le pétrole.
- Mais il est bien évident que si on utilisait des surgénérateurs il deviendrait rentable de traiter des minerais plus pauvres que 1kg par tonne. Par exemple si on se limitait à 50g par tonne, l'équivalent énergétique d'une tonne d'un tel minerais serait encore de 150t de charbon ou de 650 barils de pétrole (contre 20t de charbon pour l'uranium 235 contenu dans du minerais à 1kg par tonne). Cette considération multiplierait par un facteur de l'ordre de 1000 la quantité de combustible nucléaire disponible du fait de l'exploitation, rendue possible, de minerais plus pauvres.
- Pour la fusion le deutérium contenu dans un mètre cube d'eau est équivalent à 433 t de charbon ou 1870 Barils de pétrole et le volume des océans est de  $1,37 \cdot 10^9 \text{ Km}^3$ .

On a représenté les données du tableau graphiquement en excluant les deux dernières lignes qui correspondent à des quantités d'énergie qui ne sont pas représentables aux mêmes échelles que les autres lignes. De même on a scindé la représentation en deux graphiques, avec une ligne commune (hydrate de méthane) pour faciliter la lecture des importances relatives des énergies.

Le graphique de la Figure 2 regroupe les énergies où la technique a encore besoin de faire des progrès pour que leur utilisation soit courante.



**Figure 1 : Représentation des réserves d'énergie**



**Figure 2 : Représentation des réserves possibles d'énergie**

Il n'y a donc pas encore de réelle pénurie d'énergie à court terme, mais seulement une réelle pénurie de carburants liquides. Par contre on voit que l'enjeu des réacteurs surgénérateurs, en termes de stock d'énergie rendu accessible, est beaucoup plus important que celui des réacteurs à neutrons thermiques utilisés aujourd'hui.

## ***Les effets économiques de l'énergie***

L'augmentation gigantesque de la richesse des pays développés et les modifications des comportements et des habitudes de leurs habitants sont une conséquence de l'utilisation de plus en plus massive d'énergie bon marché.

Car l'énergie est bon marché. Pour en juger il faut introduire la notion de coût réel, que l'on doit à Jean Fourastié, et qui permet des comparaisons dans le temps (comme comparer les coûts actuels avec les coûts au moyen-âge), et dans l'espace (comme comparer les coûts en Europe et en Afrique). La référence universelle qui permettrait de mesurer le prix réel serait l'heure de travail du manoeuvre non qualifié.

Dans ce nouveau repère, le prix des services, dont la productivité n'est pas susceptible d'augmenter beaucoup, sont à peu près identiques en tout lieu et à toute époque. Par contre le prix des objets manufacturés dépend de la productivité locale de même que les prix agricoles des produits échangeables.

Pour résumer, si on ne tient pas compte de quelques distorsions comme des droits de douane, le prix des transports, des taxes et des normes plus ou moins contraignantes, le prix des biens échangeables est le même partout exprimé en monnaie officielle avec le taux de change officiel, tandis que le prix des services (lorsqu'ils ne sont pas échangeables) est le même partout exprimé en prix réels au sens de Fourastié.

Dans ce référentiel de prix réels, en un siècle, le coût de l'énergie a été divisé par plus de 50. Cette diminution du prix de l'énergie a permis une augmentation de productivité du fait de l'utilisation systématique et massive de cette énergie. L'augmentation de la productivité a fait baisser le coût réel des objets manufacturés eux aussi dans un rapport de l'ordre de 50. On pourrait croire que les chocs pétroliers ont enrayés cette baisse des prix de l'énergie mais on constate qu'il n'en est rien.

La nature nous a donné gratuitement des combustibles fossiles qui ont permis le développement des moteurs et de la chimie. Ces deux techniques sont au cœur de la totalité des machines que nous exploitons avec une productivité du travail en très forte hausse. Cette productivité explique la totalité de nos acquis sociaux qui sont le symptôme le plus visible de l'augmentation de notre richesse et la manière la plus efficace de la partager en régime capitaliste.

### **Un modèle économique qui donne une place à l'énergie**

L'énergie a le pouvoir de multiplier notre richesse et nous nous proposons d'estimer son influence sur le PIB des nations. Pour cela nous nous proposons de mettre en équivalence les services qu'elle rend avec les services du travail humain.

L'idée est de convertir l'énergie utilisée pour produire des richesses en équivalent travailleur. On expliquerait ainsi que si un Européen est en moyenne plus riche qu'un Chinois c'est qu'il utilise un nombre plus important de travailleurs virtuels qu'il paye au prix de l'énergie seulement. Ces travailleurs virtuels constitueraient une rente. Nous pouvons estimer que cette rente est détournée à 60% environ par les salariés et à 40% par les capitalistes. Cela signifie que pour chaque travailleur réel il y a une équipe, dirigée par lui, de travailleurs "virtuels" qui produisent des richesses à vil coût. Ces richesses sont ensuite partagées entre les salariés et les capitalistes et cela explique l'augmentation des rémunérations et du niveau de vie des pays avancés.

Si cette hypothèse est valable, on doit pouvoir calculer un PIB par tête en comptant dans la population, non seulement les travailleurs réels et leur famille, mais aussi les travailleurs virtuels. Le PIB par tête calculé dans ces conditions doit être le même dans tous les pays pour valider l'hypothèse. Ce PIB de référence le sera en parité de pouvoir d'achat (PPA) car si l'énergie doit être payée en taux de change officiel, les services qu'elle rendra sont appréciés en PPA, ou autrement dit, le travailleur virtuel est en concurrence avec les travailleurs locaux.

L'exercice donne des résultats probants lorsqu'on se limite au pétrole pour calculer une population de travailleurs virtuels. Cela peut paraître étrange mais les transports sont devenus plus importants dans une économie mondialisée. Le système de transport est devenu le sang du système économique et cela explique que le pétrole pilote le PIB mondial. D'autre part le pétrole est la seule énergie mondiale, les autres énergies sont locales, c'est-à-dire qu'elles sont consommées le plus souvent dans le pays où elles sont produites.

Nous avons cherché pour la Chine et les USA, quelle quantité de pétrole serait équivalente à un travailleur, pour qu'il y ait égalité des PIB par tête pour ces deux pays.

Nous avons travaillé sur les données de PIB, de consommation de pétrole, de population de ces deux pays et on a forcé une égalité du PIB par tête, en considérant la population totale, c'est-à-dire y compris la population virtuelle telle que précédemment définie.

Nous avons ensuite vérifié que cette équivalence n'entraînait pas trop de disparités lorsqu'on considérait les autres pays. Le résultat est dans le tableau suivant :

Pays	Barils/jour	Travailleurs virtuels	PIB en M\$ PPA	Population	Population totale	PIB/Tête (\$ PPA)
<b>Etats Unis</b>	18 690 000	6 107 843 137	14 120	310 232 863	6 418 076 000	2 200
<b>Union Européenne</b>	13 680 000	4 470 588 235	14 430	492 387 344	4 962 975 579	2 907
<b>Chine</b>	8 200 000	2 679 738 562	8 818	1 330 141 295	4 009 879 857	2 199
<b>Japon</b>	4 363 000	1 425 816 993	4 149	126 804 433	1 552 621 426	2 672
<b>Inde</b>	2 980 000	973 856 209	3 680	1 173 108 018	2 146 964 227	1 714
<b>Russie</b>	2 850 000	931 372 549	2 116	139 390 205	1 070 762 754	1 976
<b>Brésil</b>	2 460 000	803 921 569	2 010	201 103 330	1 005 024 899	2 000
<b>Allemagne</b>	2 437 000	796 405 229	2 815	82 282 988	878 688 217	3 204
<b>France</b>	1 875 000	612 745 098	2 094	64 768 389	677 513 487	3 091
<b>Royaume Uni</b>	1 669 000	545 424 837	2 123	62 348 447	607 773 284	3 493

**Tableau 3 : Travailleur pétroliers PIB par tête**

La quantité de pétrole, équivalente à un travailleur virtuel, qui a permis de construire ce tableau est de 0,00306 Baril/Jour soit à peu près un baril/an (ce serait le cas si l'année avait 327 jours), ce qui est assez faible.

Nous voyons que les PIB en parité de pouvoir d'achat par tête de travailleur virtuel ou réel de la Chine et des USA se sont bien égalisés, et que la disparité est maximum entre le Royaume Unis et l'Inde, sans dépasser le simple au double, ce qui est assez satisfaisant. Cette approche est approximative et doit être corrigée, en effet les différences qui demeurent peuvent s'expliquer en grande partie par des différences importantes dans les efficacités énergétiques des PIB, qui mesurent l'efficacité avec laquelle on utilise l'énergie pour produire.

Si on considère maintenant la consommation totale d'énergie, il n'est pas possible d'obtenir simplement l'équivalence par tête des PIB en tenant compte des travailleurs virtuels. En effet la Chine, par exemple, consomme plus d'énergie que les USA et a un PIB inférieur. Pour sortir de cette impasse il faut considérer la "qualité" de l'énergie. C'est une notion qui est expliquée dans l'étude "Energy and the US Economy : a Bio-Physical Perspective"<sup>1</sup> :

<sup>1</sup> [http://www.esf.edu/efb/hall/.%5Cpdfs%5Cenergy\\_US\\_economy.pdf](http://www.esf.edu/efb/hall/.%5Cpdfs%5Cenergy_US_economy.pdf)

Cette étude montre que le pétrole doit être considéré comme ayant plus de valeur que le charbon. C'est explicable car si le pétrole peut se substituer au charbon dans tous ses usages le contraire n'est pas vrai facilement. Si par exemple on voulait substituer le charbon au pétrole pour le transport, il faudrait sans doute revenir aux trains et aux machines à vapeur pour cela.

Dans le

Tableau 4 (données 2009) les différentes énergies sont exprimées en Millions de tonnes équivalent pétrole. On a pénalisé les énergies d'infrastructure par rapport au pétrole qui permet la mobilité dans un rapport 2 sauf pour le charbon où le rapport est 3.

Nous avons gardé la même définition d'un "travailleur virtuel" ce qui diminue le PIB par tête puisque le PIB ne change pas et que l'on considère toute l'énergie consommée et non pas seulement le pétrole. Les résultats sont donnés par ordre d'efficacité croissante (colonne PIB/Tête (\$ PPA)).

Millions de Tep	Pétrole	Gaz Naturel	Charbon	Energie Nucléaire	Hydro	Total	Total énergie qualité	Population totale	PIB/Tête (\$ PPA)
<b>Russie</b>	124,9	350,7	82,9	37,0	39,8	635	<b>366,3</b>	2 793 805 591	757
<b>Chine</b>	404,6	79,8	1537,4	15,9	139,3	2177	<b>1034,6</b>	8 827 062 724	999
<b>Inde</b>	148,5	46,7	245,8	3,8	24,0	469	<b>267,7</b>	3 113 031 834	1182
<b>US</b>	842,9	588,7	498,0	190,2	62,2	2182	<b>1429,5</b>	10 668 645 550	1324
<b>Brésil</b>	104,3	18,3	11,7	2,9	88,5	226	<b>163,1</b>	1 382 720 762	1454
<b>France</b>	87,5	38,4	10,1	92,9	13,1	242	<b>163,0</b>	1 245 900 759	1681
<b>Union Européenne</b>	670,8	413,9	261,3	202,6	73,9	1623	<b>1103,2</b>	8 486 395 995	1700
<b>Japon</b>	197,6	78,7	108,8	62,1	16,7	464	<b>312,6</b>	2 392 143 772	1734
<b>Allemagne</b>	113,9	70,2	71,0	30,5	4,2	290	<b>190,0</b>	1 459 049 165	1929
<b>Royaume Uni</b>	74,4	77,9	29,7	15,7	1,2	199	<b>131,7</b>	1 016 479 095	2089

**Tableau 4 : Travailleurs énergétiques PIB par tête**

Nous pouvons remarquer en consultant ces tableaux que l'énergie est utilisée avec une efficacité variable d'un pays à l'autre et en quantité variable elle aussi. Normalement l'avantage que procure l'énergie est tel que son utilisation devrait être maximum dans tous les pays.

En fait toutes les sociétés doivent "décoller" à partir de la société traditionnelle agraire où la seule énergie disponible est celle fournie par le travail humain et animal. Or dans cette société l'énergie a un prix élevé qui limite son emploi.

Pour le démontrer nous allons prendre l'exemple du Congo qui est l'un des pays où le pouvoir d'achat est le plus faible. Ce pays a déjà évolué par rapport à la société traditionnelle car le PIB est partagé de manière à peu près égale entre les secteurs primaire, secondaire et tertiaire alors que dans la société traditionnelle le secteur primaire représente 80% des richesses.

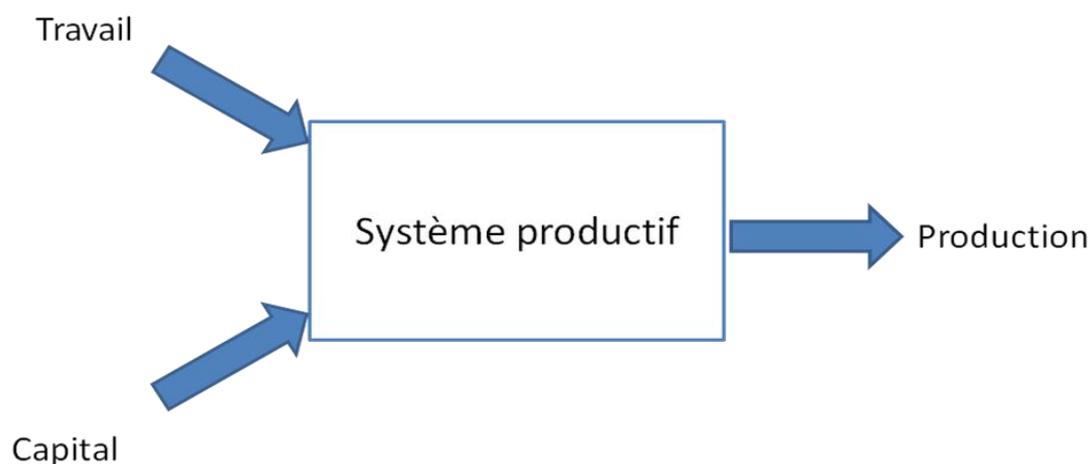
Nous pouvons calculer pour le Congo, où le PIB par tête en PPA est de 300\$, les éléments analogues à ceux du

Tableau 3 : nous trouvons que la population virtuelle est négligeable (4% de la population réelle) que le bénéfice unitaire des travailleurs énergétiques est de 347 \$ PPA pour un baril actuellement à 100 \$ aux taux officiels, c'est-à-dire 180 \$ PPA au Gabon. Il n'y a que les "riches" qui peuvent se permettre l'utilisation du pétrole et la faible consommation globale montre qu'ils sont peu nombreux. Même pour les riches, seuls les usages les plus rentables de l'énergie sont possibles.

La richesse PPA d'un Français est plus de 100 fois supérieure à la richesse PPA d'un Congolais ! Pour un Congolais il est vraisemblable que le prix de l'énergie a augmenté. Donc il n'est pas si facile d'utiliser beaucoup d'énergie pour augmenter sa richesse, il faut d'abord l'utiliser avec un minimum d'efficacité puis avoir atteint un certain niveau économique pour que les usages les moins rentables soient justifiés.

### ***L'évolution de l'économie avec l'énergie***

Le processus général qui représente habituellement l'économie est illustré sur la Figure 3



**Figure 3 : Schéma général de l'économie**

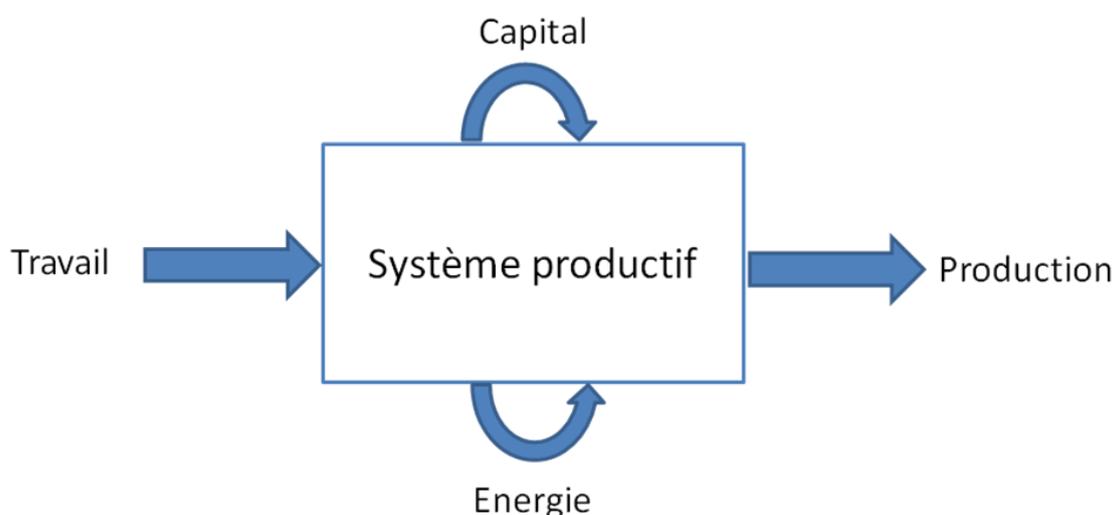
Dans ce schéma le système productif utilise du capital et du travail pour réaliser une production. La société traditionnelle, agraire, utilisait très peu de capital et beaucoup de travail pour produire à peine de quoi subsister.

Dans la société capitaliste, le travail est considéré comme une ressource rare et chère. On cherche des processus qui économisent le travail c'est-à-dire qui augmentent la productivité. Cela se réalise en utilisant des machines, c'est-à-dire en augmentant le capital.

Le modèle fonctionne tant que l'on peut négliger l'énergie comme facteur de production, en effet les machines ne peuvent fonctionner qu'avec de l'énergie et si on a pu la négliger c'est parce qu'elle était à un prix ridiculement bas. Mais il fonctionne de moins en moins bien car l'énergie commence à manquer, non pas du fait de son prix, qui est encore bas, mais en volume.

Si le modèle était encore valable, il suffirait de baisser le coût du travail et du capital pour que l'économie reparte. C'est bien ce qu'on a essayé de faire en baissant les charges sur le travail et en réduisant les taux d'intérêts pratiqués par la banque centrale. Le chômage ne s'est pas résorbé et on a eu droit à des bulles financières.

Dans un système où le stock d'énergie fossile est fini, sauf à souscrire à une vision d'une société économe en énergie avec un capital et une production évoluant vers la réduction, il faudrait pour tenir compte de l'énergie, modifier le schéma traditionnel de l'économie de la manière représenté sur la Figure 4.



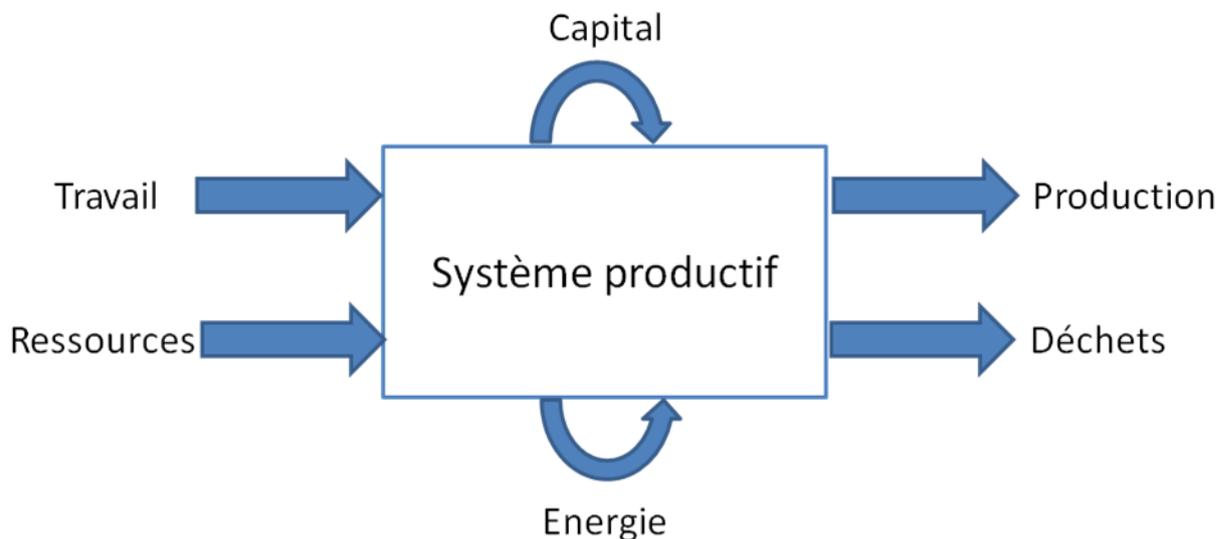
**Figure 4 : Schéma modifié de l'économie**

Nous avons représenté le capital et l'énergie sous forme de boucle : c'est assez évident pour le capital qui est une production qu'on accumule, et cela devra être le cas pour l'énergie. Pour l'instant l'énergie que l'on consomme provient d'un stock que l'on n'a pas eu besoin de constituer.

Lorsque le stock sera épuisé il faudra bien se tourner vers d'autres sources d'énergie. Si l'on se réfère au paragraphe "La disponibilité de l'énergie", les sources candidates sont les énergies renouvelables, l'énergie nucléaire et l'énergie thermonucléaire. Les énergies renouvelables sont diffuses et il faut du travail pour les capter et les concentrer, les énergies nucléaire et thermonucléaire demande aussi des installations et du travail pour pouvoir être utilisée, et lorsque la production de pétrole ne sera plus suffisante pour les besoins de l'économie, il faudra sans doute produire des carburants synthétiques pour lesquels on mobilisera du capital et du travail.

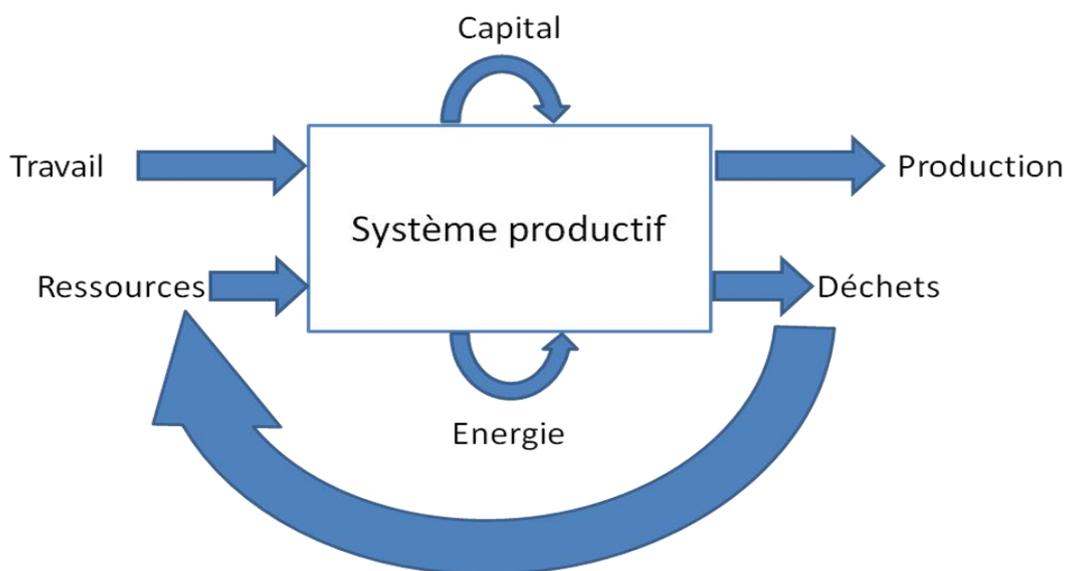
Avec ce schéma, par analogie avec la société capitaliste qui crée du capital en plus de la production, on pourrait avoir une société "énergétiste" qui produit toute l'énergie dont elle a besoin en plus du capital et de la production.

Ce schéma doit encore être amélioré car il ne prend pas en compte les ressources dont le stock est fini. Toujours par analogie, de la même façon que la société capitaliste a évolué pour être économe en travail, la société énergétiste, en plus d'être économe en travail, devra être économe en ressources. On aurait alors le schéma de la Figure 5 pour représenter la nouvelle économie.



**Figure 5 : Economie avec ressources**

Quel est concrètement le moyen d'arriver à ce processus ? Les ressources du monde sont non-extensibles ce qui entraîne que le modèle doit intégrer l'idée de finitude du monde matériel. Il faut d'abord être économe dans l'emploi des ressources, mais surtout il faut les recycler à 100%. Car rien ne quitte la Terre hormis l'énergie qui est consommée, ce qui implique que le stock peut être réutilisé. L'économie consisterait alors à utiliser de mieux en mieux les ressources qui sont à notre disposition. Nous pouvons imaginer qu'il y a une possibilité de substitution du capital immatériel qui compense les pertes minimisées du capital matériel. Ces considérations amènent le schéma suivant :



**Figure 6 : Economie avec recyclage des déchets**

De façon pratique on peut examiner les deux problèmes suivants :

- Est ce que le stock de ressources naturelles se déprécie ?
- Quel est le degré de substitution entre le capital immatériel et matériel ?

Nos activités utilisent l'énergie pour transformer la matière, les produits de cette transformation sont appréciés et utilisés (c'est ce qui fait leur valeur) et lorsqu'ils sont en fin de vie ils sont considérés comme des déchets. Mais bien souvent ils sont plus riches en éléments récupérables que les minerais dont on se contente pour produire la matière première. Avec de l'énergie on peut donc minimiser les pertes matérielles qui résultent de l'activité économique.

De ce fait c'est pour l'énergie que la question du degré de substitution entre le capital physique et humain doit être posée. Or le savoir a augmenté le stock d'énergie accessible à l'humanité. Le 20ème siècle nous a donné l'énergie nucléaire qui décuple le stock d'énergie accessible grâce à la surgénération, comme nous l'avons montré au paragraphe sur "La disponibilité de l'énergie".

Cependant la substitution entre capital physique et humain est imparfaite et mérite beaucoup d'attention pour s'assurer que le développement soit un progrès réel. En particulier il est sans doute indispensable que l'économie intègre la dépréciation des stocks finis de ressources naturelles.

### ***La taxe Carbone***

Nous allons mener dans ce paragraphe une discussion sur la taxe carbone qui pourrait être généralisée à toutes les ressources. Le carbone nous est donné gratuitement sous forme de charbon de pétrole et de gaz. Le prix que l'on paye ne correspond qu'à son extraction, son raffinage et sa distribution.

Une taxe pourrait être justifiée pour deux raisons

- Il faut que la ressource ait un coût pour que son utilisation soit économe,
- La consommation de carbone s'accompagne de rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère qui est un déchet et doit donc être pénalisé.

Nous voyons que ces deux arguments sont valables aussi pour toutes les autres ressources finies.

La création d'un nouvel impôt est toujours assez mal vue de la part des contribuables. Mais tout le monde s'accorde à dire qu'il faut des impôts, le problème est de bien choisir les impôts qu'il nous faut. Un impôt qui incite à économiser une ressource rare est un impôt intelligent, et donc c'est un bon candidat pour faire partie d'un ensemble qui dose les différentes qualités recherchées, pour avoir un système d'imposition juste.

### **La politique fiscale et le pétrole**

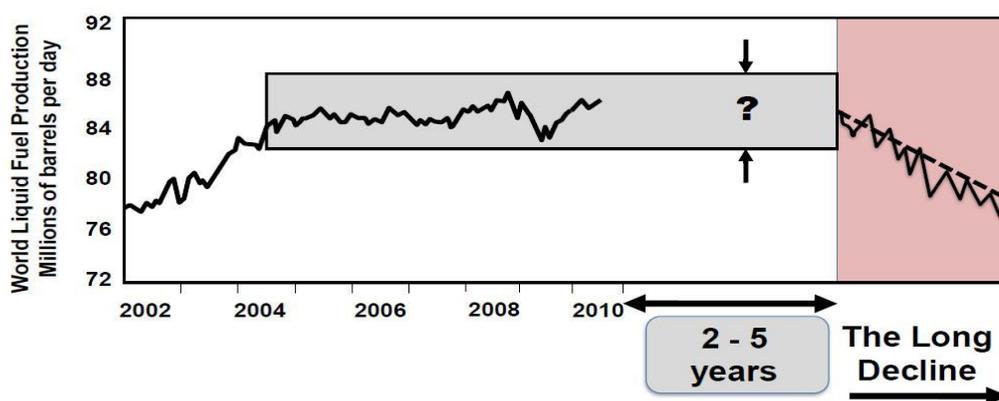
Pour justifier l'intérêt de la taxe carbone nous allons raisonner sur le cas du pétrole. Cette approche est justifiée pour les raisons suivantes :

- Les études prospectives montrent que nous avons atteint un plateau dans la production de pétrole et que la production de celui-ci n'augmentera plus mais baissera après la fin du plateau.
- Le pétrole joue un rôle directeur en ce qui concerne le prix des autres énergies.
- Le pétrole est l'énergie qui a la meilleure "qualité" comme montré au paragraphe "Un modèle économique qui donne une place à l'énergie".
- En France au moins l'augmentation des rejets de CO<sub>2</sub> est due principalement à la mobilité qui consomme presque exclusivement du pétrole.

De plus en plus de spécialistes pensent que la production de pétrole a atteint un plateau. On aurait donc, pour l'économie, une nécessité de s'adapter à une contrainte sur les volumes. Nous pouvons décrire cette adaptation ainsi :

- Si le prix monte, certaines applications deviennent non rentables il y a arrêt des activités correspondantes et récession.
- Dans "le prix du pétrole gouverne-t-il l'économie ?" J.M. Jancovici fait l'hypothèse d'une corrélation entre le prix du pétrole une année, la faiblesse de l'économie l'année suivante et le chômage 3 ans après.
- Cet impact est une boucle de rétroaction négative qui va donc stabiliser le prix et le volume, mais comme cet impact est retardé il va créer une instabilité bien connue des automaticiens : le système "pompe".

**We believe that world oil production will likely stay on its current plateau & enter decline in 2 - 5 years.**



**Figure 7: Le plateau oscillant<sup>3</sup> de la production de pétrole**

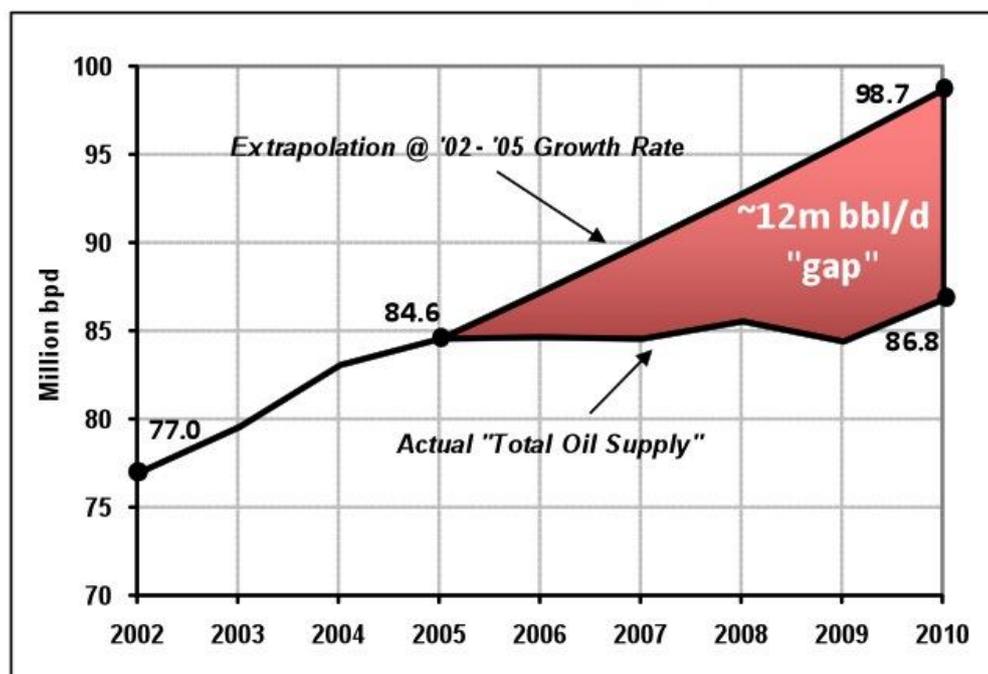
<sup>2</sup> Source : [http://www.manicore.com/documentation/petrole/petrole\\_economie.html](http://www.manicore.com/documentation/petrole/petrole_economie.html)

<sup>3</sup> [http://www.aspousa.org/2010presentationfiles/10-8-2010\\_aspousa\\_KeynoteEnergyMess\\_Hirsch\\_R.pdf](http://www.aspousa.org/2010presentationfiles/10-8-2010_aspousa_KeynoteEnergyMess_Hirsch_R.pdf)

Il y a bien adaptation de l'économie à la quantité de pétrole disponible, mais le fait que système "pompe" explique que l'on observe un plateau oscillant pour la production de pétrole.

La phase initiale du plateau en question est bien documentée car déjà réalisée :

## EIA Total Oil Supply



**Figure 8 : Phase initiale du plateau oscillant<sup>4</sup>**

Cette stagnation a eu lieu alors que les émergents, dont l'Inde et la Chine, ont des besoins croissants en énergie. Le pétrole disponible pour les économies avancées est déjà en déclin, ce qui explique en grande partie "la crise". Une extrapolation de ce phénomène est proposée sous la forme du graphique de la Figure 9 où nous voyons deux phénomènes :

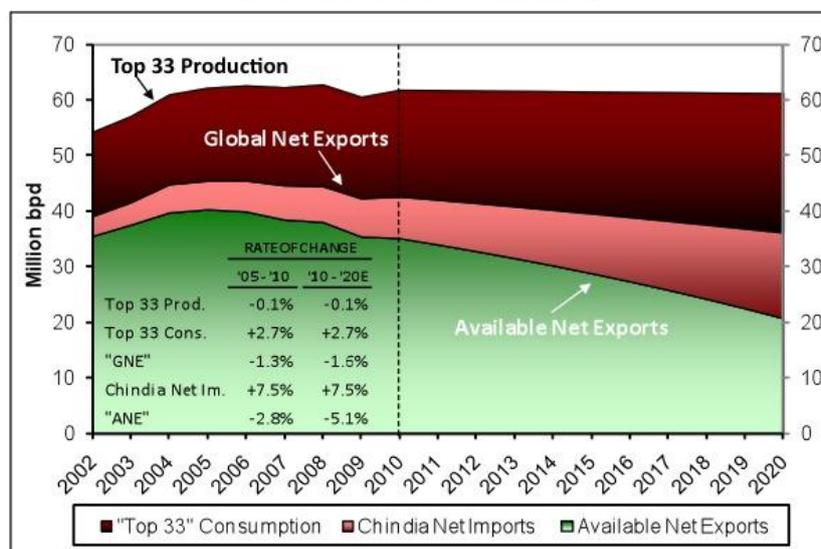
- Les pays exportateurs gardent une proportion de plus en plus importante de la production pour eux.
- La croissance de la Chine et de l'Inde réduit le pétrole disponible pour le reste du monde.

Le pic de disponibilité du pétrole pour les pays avancés a eu lieu en 2005. Avec un impact retardé de 3 ans cela explique bien la crise 2007/2008.

<sup>4</sup> <http://i1095.photobucket.com/albums/i475/westexas/Slide1-18.jpg>

## Top 33 Net Exporters: "Claims on Production"

(0.1%/Year Production Decline 2010 to 2020)



**Figure 9 : Export Net disponible<sup>5</sup>**

La France risque de se trouver confrontée à un manque de pétrole, en particulier si la régulation est faite par l'offre des pays producteurs, et non par un système de taxe pour limiter la consommation.

Dans ce cas le prix de l'énergie fossile sera élevé. La France a intérêt à réduire sa consommation de carburant pour éviter une perte de devises et pour préserver la sécurité de son approvisionnement en énergie.

Nous pouvons estimer un prix de 40\$ par baril si l'on savait diviser la demande mondiale par deux. Au contraire cette même division par une limitation de l'offre aurait pour effet de faire monter les prix à 170\$ par baril.

La différence de 130\$ par baril est une rente.

La demande d'énergie fossile peut être régulée par des réglementations ou par un impôt sur la consommation. Si on voulait limiter les consommations par l'impôt et si le marché de l'énergie fossile était parfaitement concurrentiel, il faudrait un impôt équivalent à 130\$ par baril.

Nous pourrions dire que la rente existe toujours quel que soit le mode de régulation et qu'elle est localisée dans le pays producteur ou dans les pays consommateurs. Mais si le prix du pétrole montait, la rente serait versée aux pays exportateurs par les pays importateurs.

Par contre, si la demande est freinée par un impôt sur la consommation finale, la rente serait versée au fisc et l'on aurait un simple transfert financier à l'intérieur du pays, le produit de l'impôt étant restitué d'une façon ou d'une autre aux habitants.

<sup>5</sup> <http://i1095.photobucket.com/albums/i475/westexas/Slide10-1.jpg>

L'exemple américain nous permet de valider qu'une taxation du carbone aurait bien pour effet d'optimiser l'emploi des combustibles fossiles. En Europe, la TIPP qui est une sorte de taxe carbone pour les véhicules, a pour effet de diviser par deux la consommation des voitures européennes par rapport aux voitures américaines.

### ***Le pétrole***

Nous avons vu au paragraphe "La disponibilité de l'énergie" que celle-ci était grande, mais qu'elle était surtout constituée par de l'énergie nucléaire. L'énergie nucléaire en question ne pourrait s'extraire que si nous étions capables de mettre au point une filière industrielle sûre qui soit surgénératrice.

Même dans ce cas on ne disposerait que d'une énergie d'infrastructure, au sens où il faut des installations lourdes pour exploiter cette énergie. Par contre le pétrole permet la mobilité et c'est ce qui fait que nous lui avons donné une grande qualité dans le paragraphe "Un modèle économique qui donne une place à l'énergie".

Le pétrole est simple à utiliser, un poêle ou un moteur suffisent. De plus le pétrole est une réserve extrêmement compacte d'énergie c'est ce qui justifie l'utilisation des combustibles fossiles pour le transport. Le tableau **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** synthétise l'efficacité du stockage sous la forme du coefficient multiplicateur qu'il faut appliquer aux autres sources d'énergie pour stocker la même quantité d'énergie que le pétrole.

<b>Charbon</b>	<b>Bois</b>	<b>Paille séchée</b>	<b>Hydrogène comprimé</b>	<b>Batterie LMP</b>	<b>Batterie Plomb</b>
1,5	2	3	20	70	300

**Tableau 5 : Efficacité du stockage d'énergie**

Il faut de plus noter que pour le charbon, le bois et la paille séchée, l'extraction de l'énergie est plus difficile que pour le pétrole, ce qui alourdirait encore le véhicule qui l'utiliserait.

Pour rendre justice aux énergies alternatives qui pourraient être utilisées dans les transports, il faut tenir compte des rendements qui sont possibles avec chacune d'entre elles. Le tableau qui synthétise l'efficacité du stockage est alors modifié comme suit :

<b>Charbon</b>	<b>Bois</b>	<b>Paille séchée</b>	<b>Hydrogène comprimé</b>	<b>Batterie LMP</b>	<b>Batterie Plomb</b>
1,5	2	3	12	24	100

**Tableau 6 : Efficacité tenant compte des rendements**

Il faut enfin préciser que c'est le poids des bouteilles qui explique le coefficient appliqué à l'hydrogène comprimé.

## La pénurie qui s'annonce

Puisque le carburant est encore ce qu'il y a de mieux pour stocker l'énergie, il est vraisemblable que l'on produira du carburant de synthèse pour remplacer le pétrole lorsqu'il sera épuisé afin de pouvoir continuer à assurer la mobilité.

Le pétrole est précieux, il a permis une croissance de la productivité du travail par la mécanisation des activités et par la vitesse des déplacements qu'il autorise. Cette productivité accrue se traduit par une richesse plus grande dans les pays qui savent mettre en œuvre efficacement l'énergie dans les différents procédés de production. Considéré de ce point de vue, la valeur du pétrole est bien plus grande que son coût et que son prix. En période de pénurie il est donc vraisemblable qu'une marge importante à la hausse existe pour son prix.

Or nous sommes dans une période où l'offre de pétrole ne suit pas la demande. Les spécialistes pronostiquent un déclin de la production de pétrole à partir de 2015. Par exemple le rapport PEAKING OF WORLD OIL PRODUCTION<sup>6</sup> qui date de Février 2005 et analyse les mesures qu'il conviendrait de prendre pour minimiser les conséquences d'une pénurie de pétrole évalue la date du pic entre 2015 et 2025.

Ce rapport montre que la situation de pénurie est probable, que les mesures éventuelles nécessitent du temps pour avoir un effet significatif et qu'à l'échelle de ce temps la situation de pénurie est à brève échéance. Pour fixer les idées le rapport préconise de mettre en œuvre, de manière idéale, des mesures d'urgence 20 ans avant que la pénurie soit avérée et montre qu'une mise en œuvre 10 ans avant permet encore d'atténuer les effets les plus désagréables.

Le rapport ne prétend pas qu'il va y avoir une crise de l'énergie, au contraire il précise bien que l'énergie restera abondante à court terme (au sens des 10 à 20 ans de l'horizon du rapport). De son point de vue il va juste y avoir une pénurie de carburant liquide et donc les principales mesures préconisées ont pour but de réduire l'écart entre les besoins et la production :

- Améliorer le pourcentage de pétrole récupérable sur les sites déjà connus.
- Mettre en exploitation les pétroles non conventionnels (Pétroles lourd, sables bitumeux...).
- Développer (ce qui veut dire construire des usines, les recherches ayant un impact trop lointain) des procédés pour transformer du gaz en liquide.
- Produire des combustibles liquides à partir du charbon, des "oil shale" et de la biomasse.
- Changer pour une autre source d'énergie chaque fois qu'on peut remplacer les combustibles liquides par d'autres énergies (par exemple le chauffage résidentiel).

Il n'y a donc aucune préoccupation écologique dans ce rapport mais seulement la mise en évidence d'un risque et la proposition de mesures pour l'atténuer voir le supprimer avec un peu de chance.

On peut aussi vouloir faire baisser la consommation et dans ce cas il n'y a que deux possibilités la hausse des prix et la récession.

En France les installations fixes qui consomment de l'énergie devraient s'orienter de plus en plus vers l'électricité. Le train et le métro devraient donc se développer, les véhicules consommant peu

---

<sup>6</sup> [http://www.netl.doe.gov/publications/others/pdf/Oil\\_Peaking\\_NETL.pdf](http://www.netl.doe.gov/publications/others/pdf/Oil_Peaking_NETL.pdf)

aussi et marginalement les véhicules électriques. Sans doute également le carburant de synthèse dont le coût va devenir compétitif.

## La géopolitique du pétrole

Lorsque les ressources se font rares leur prix augmente et les utilisations peu rentables sont évitées. On dit que le marché optimise l'emploi des ressources rares. Mais cette augmentation peut sembler insupportable lorsque des emplois qui étaient "ordinaires" commencent à être hors de prix. Dans ce cas les puissants s'organisent pour avoir le monopole de l'emploi, par la force si il le faut. Au niveau des pays cela s'appelle la guerre.

Le vingtième siècle a été le théâtre de nombreuses guerres du pétrole, alors que celui-ci était encore abondant, simplement pour maintenir son prix suffisamment bas. On peut penser qu'avec la pénurie qui s'annonce le vingt et unième siècle risque d'être encore pire si on ne fait rien. Un article de Michael T Klare<sup>7</sup> édité en français sur le site de contreinfo illustre ce risque :

*"Une autre conséquence déplorable est également certaine : durant l'ère de l'énergie extrême on assistera aussi à d'intenses conflits géopolitiques, lorsque les grands consommateurs d'énergie et les producteurs comme les États-Unis, la Chine, l'Union européenne, la Russie, l'Inde et le Japon rivaliseront pour le contrôle des ressources restantes. La Russie et Norvège se disputent déjà au sujet de leurs frontières maritimes en mer de Barents, qui est vue comme l'une source prometteuse de gaz naturel dans le grand nord, tandis que la Chine et le Japon se sont affrontés lors d'une dispute frontalière similaires en mer de Chine orientale, qui abrite un autre important gisement gazier. Toutes les nations de l'Arctique - le Canada, le Danemark, la Norvège, la Russie et les États-Unis - revendiquent de grandes étendues de l'océan Arctique, se chevauchant parfois, provoquant de nouveaux conflits frontaliers dans ces régions riches en ressources énergétiques.*

*N'oublions pas non plus de mentionner les zones de conflit actuelles, comme le Nigeria, le Moyen-Orient, et le bassin de la Caspienne."*

Mais jusqu'où le prix peut-il monter ?

Le pétrole est un facteur de production, normalement son prix est fixé par l'utilité marginale du dernier baril, à condition que le coût d'extraction de ce dernier soit inférieur à ce prix. Mais l'utilité du pétrole est grande si bien que le prix est plus lié au coût d'extraction des gisements les plus difficiles qu'à l'utilité proprement dite.

En situation de pénurie la loi normale, c'est à dire un prix qui reflète l'utilité marginale, risque de s'appliquer, à moins que des guerres produisent une segmentation du marché avec des monopoles régionaux. Dans le paragraphe "Un modèle économique qui donne une place à l'énergie on montre que si des pays sont plus riches que d'autres c'est que le pétrole leur permet de bénéficier d'équivalent travailleurs, qui résultent de l'emploi du pétrole. Cette constatation montre quelle est l'utilité réelle du pétrole et quel pourrait être son prix, s'il devait égaliser l'intérêt de l'usage du pétrole et de l'usage du travail humain, pour obtenir un résultat.

Une deuxième remarque concerne le changement de régime qui se profile. Jusqu'à présent le volume total de pétrole extrait n'était pas une contrainte pour la croissance mondiale. On pouvait "acheter" autant de travailleurs pétro-virtuel que l'on voulait. A partir du moment où la production

<sup>7</sup> [http://contreinfo.info/article.php3?id\\_article=2817](http://contreinfo.info/article.php3?id_article=2817)

de pétrole décline, la population pétro-virtuelle totale décline aussi. On a alors les conséquences suivantes :

- La production de pétrole va décroître,
- Si des pays s'enrichissent (sont en croissance) ce sera en utilisant plus de population virtuelle, ce qui implique que d'autres doivent s'appauvrir (décroître), puisque la production totale de pétrole ne peut plus croître.
- Les pays développés accepteront-ils de voir diminuer leur richesse pour les pays en développement ?
- Un pays en développement utilise moins bien le pétrole (en termes de PIB) qu'un pays développé, ce qui accroît la décroissance globale du PIB.

Il devrait y avoir encore un peu de croissance de la population "réelle" ce qui favorise le PIB global mais fait décroître le PIB par tête. Pour faciliter la satisfaction des besoins de court terme, les pays développés, qui peuvent payer le pétrole plus cher, devraient substituer au pétrole un autre type d'énergie chaque fois que cela est possible, et produire du pétrole de synthèse, et les pays en développement devraient améliorer l'indice énergétique du PIB et favoriser les transports en commun.

## ***Le Gaz***

Le gaz peut être utilisé comme matière première pour produire de l'hydrogène, du méthanol, de l'ammoniac, de l'hydrogène ou comme combustible industriel ou domestique (chauffage, cuisson). Dans le monde, il participe pour environ 20% à la production de l'électricité. Considéré comme un combustible souple, efficace et simple d'utilisation, il peut être stocké et transporté. Lors de sa combustion, le gaz génère, à production d'énergie équivalente, de 30 à 50% d'émissions de CO<sub>2</sub> en moins que le pétrole.

La production d'électricité à l'aide du gaz peut se faire en utilisant des centrales à cycle combiné (CCG) qui atteignent des rendements de plus de 60 %, contre 37 % pour les centrales à gaz classiques. Une centrale à cycle combiné, est une centrale thermique qui associe deux types de turbines : une turbine à gaz et une turbine à vapeur.

Dans une centrale à cycle combiné, la turbine à gaz est actionnée par les gaz issus de la combustion à haute température (jusqu'à 1 500°) et la turbine à vapeur utilise les gaz en sortie de la première turbine, qui sont encore suffisamment chauds (entre 400° et 650° environ) pour générer de la vapeur.

Ces centrales peuvent fonctionner en semi-base et constituent le moyen d'ajustement du réseau électrique le moins coûteux.

Le pic de production du gaz est prévu vers 2030.

## **La géopolitique du gaz**

Le gaz est une énergie locale : 25% du gaz est exporté contre 50% du pétrole et sur ces 25% seulement 8% le sont par méthanier. Pour le reste il faut avoir construit un gazoduc, ce qui est un investissement important, pour relier les pays producteurs aux pays consommateurs.

Le transport du gaz est coûteux. Le gaz naturel liquéfié (GNL) réduit de 650 fois le volume du gaz. Il facilite son transport sur de longues distances par méthanier.

A contenu énergétique identique, le coût de transport du gaz est 5 fois supérieur à celui du pétrole.

La Russie, le Canada, la Norvège et l'Algérie sont les principaux pays exportateurs. Ils exportent en Europe qui importe plus de la moitié de sa consommation. Avant de développer la production des gaz non conventionnels, les Etats-Unis qui sont les plus gros consommateurs mondiaux de gaz, importaient du gaz canadien.

La géopolitique du gaz se traduit par une concurrence sur le tracé des gazoducs : ceux-ci figent les possibilités d'échanges et les sources d'approvisionnement. Les pays de transit peuvent poser des problèmes de sécurité en prélevant du gaz pour leur propre besoins ou en fermant le gazoduc.

Les Etats Unis ont passé leur pic pétrolier en 1972. Depuis cette date ils ont intérêt à maintenir bas le prix du pétrole. Ils sont arrivés à leurs fins dans les années 80 et c'est sans doute, avec la course aux armements, une des causes majeures de la chute de l'URSS. En effet l'URSS avait besoin des devises que procurait la vente de son pétrole pour survivre économiquement, les prix bas du pétrole ont alors asphyxié le pays. Le renouveau ultérieur de la Russie trouve aussi son explication dans la remontée des prix du pétrole.

L'importance stratégique de l'énergie et les conséquences dramatiques de la manipulation de son prix n'ont pas échappées au gouvernement Russe. Celui ci a mis au point une stratégie énergétique qui englobe le pétrole et le gaz. Or la répartition des gisements pétroliers se concentre dans des zones où les USA sont présents depuis des années. Les Russes en voyant leurs perspectives limitées dans ce domaine ont décidé de contrôler la production, le transport et la commercialisation du gaz.

Au 21ème siècle le gaz sera une des principales sources d'énergie lorsque la disponibilité du pétrole ne sera plus assurée. Les instruments de la stratégie Russe sont les projets Nord Stream et South Stream, la cible de cette stratégie est l'économie européenne qui va dépendre du Gaz.

Le projet Nord Stream relie directement la Russie à l'Allemagne en passant à travers la mer Baltique sans passer par la Biélorussie. Le projet South Stream commence en Russie, passe à travers la mer Noire jusqu'à la Bulgarie et se divise entre la Grèce et le sud de l'Italie d'une part, et la Hongrie et l'Autriche d'autre part.

Pour ne pas dépendre entièrement des Russes l'Europe soutient le projet Nabucco dont l'initiative revient aux Etats Unis. Le projet Nabucco part de la Mer Noire, passe par la Turquie puis par la Bulgarie, traverse la Roumanie, la Hongrie, arrive en Autriche et de là se dirige vers la République Tchèque, la Croatie, la Slovénie et l'Italie.

De nouvelles découvertes de gaz ont eu lieu récemment en Méditerranée en Syrie et au large d'Israël et du Liban. Les Etats Unis souhaiteraient que le gaz Iranien et ce gaz nouvellement découvert transitent par Nabucco. Or en juillet 2011, l'Iran a signé des accords concernant le transport de son gaz via l'Irak et la Syrie avec un stockage intermédiaire en Syrie.

C'est la réponse syrienne aux tentatives de contrôle Etats Unis/OTAN et c'est ce qui explique le niveau d'intensité de la lutte qui se joue pour le contrôle de la Syrie et du Liban. Qui contrôle la Syrie pourrait contrôler le Proche-Orient lorsque le gaz aura révélé toute son importance.

La Turquie qui a misé sur Nabucco se sent exclue car ce projet est retardé pour des raisons techniques et l'accord Syrien se fait à son détriment.

L'Allemagne est partie prenante pour Nord Stream ainsi que pour les lieux de stockage de South Stream qui se feront en Autriche dans sa zone d'influence. Mais elle reste discrète sur cette stratégie germano-russe et prétend qu'elle améliore la « sécurité énergétique » de l'Europe. Enfin, lorsque les Européens s'opposent à sa politique vis-à-vis de la Russie, elle affirme que les plans de l'Europe pourraient pousser la Russie à vendre son gaz en Asie, au détriment de la sécurité énergétique européenne.

Les Russes pourront contrôler la distribution de l'énergie dans plusieurs pays et seront en mesure de vendre leur gaz au plus offrant. En parallèle Moscou a acheté du gaz en Asie centrale et en mer Caspienne dans le but de d'étouffer Nabucco et de contrer Washington politiquement, économiquement et stratégiquement.

La principale menace pour Nabucco, c'est cette tentative russe de le faire échouer en négociant des contrats plus avantageux que les siens en faveur de Gazprom pour Nord Stream et South Stream. Cette approche neutraliserait les initiatives des États-Unis en diminuant leur influence et en contrant leurs espoirs relatifs au gaz Iranien et Méditerranéen.

### ***La loi exponentielle***

La loi exponentielle est la fonction mathématique qui exprime qu'une grandeur croît (ou décroît) avec un taux constant au cours du temps. On n'en parlerait pas ici si l'objectif économique de tout gouvernement qui se respecte n'était justement d'avoir une économie en croissance avec un taux, le plus élevé possible, qui facilite la gestion de tous les besoins dont la satisfaction permettra l'approbation des électeurs. En économie la croissance d'une grandeur est exprimée en général en % par an.

Par exemple la croissance en volume du PIB Français de 1950 à 2010 a été en moyenne de 3,38%<sup>8</sup>, ce qui l'a fait passer de la base 100 en 1950 à la base 735 en 2010.

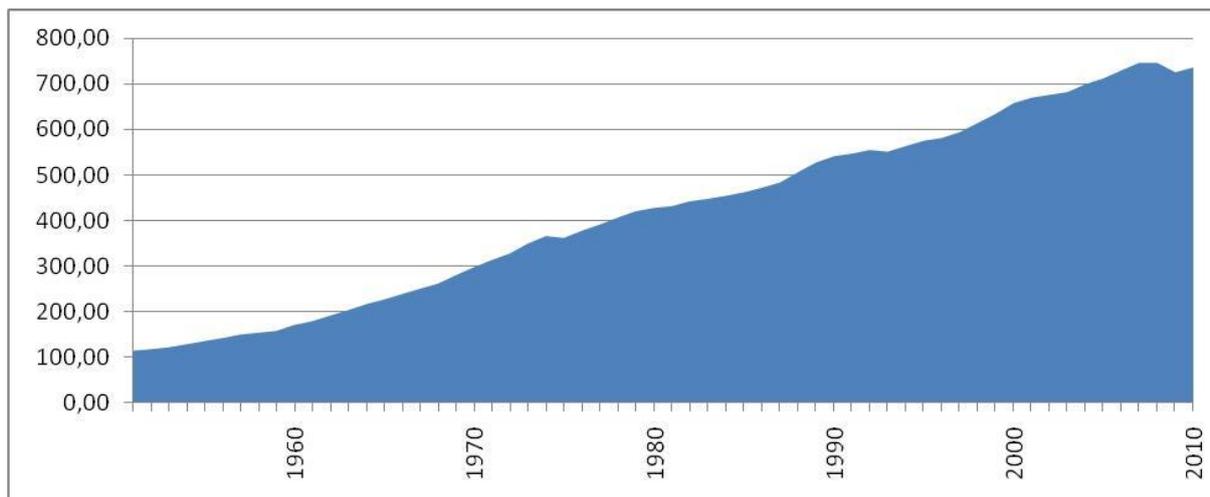
On a montré dans le paragraphe "Les effets économiques de l'énergie" que le PIB et la consommation d'énergie ont une évolution parallèle pour des raisons fondamentales. Par exemple la consommation d'énergie en France, corrigée des variations climatiques était de 179,7 Mtep en 1973 et 265,8 Mtep en 2010 soit un rapport de 1,47<sup>9</sup>, alors que le PIB a varié dans le rapport 2,10. La différence entre les deux s'explique par les progrès qui sont fait dans l'utilisation de l'énergie lesquels se traduisent par un indice énergétique du PIB décroissant. Le taux de progression de la consommation d'énergie ressort de ces considérations à 1,01%.

Avec une loi exponentielle de progression d'une consommation ou d'une production on arrive à des chiffres représentant des volumes totalement absurdes au bout de quelques siècles. Pour s'en convaincre on va examiner ce qui se passerait si la France continuait sa progression du PIB de 3,38% chaque année ce qui impliquerait une progression de 1,01% de sa consommation d'énergie. En fait c'est peu probable car on voit bien sur le graphique que depuis 2007 le PIB Français est lui aussi entré dans une phase de plateau ascillant.

---

<sup>8</sup>Source : Insee, comptes nationaux, base 2005

<sup>9</sup> Source : comité professionnel du pétrole (CPDP)



**Figure 10 : Progression du PIB Français**

On va extrapoler la consommation d'énergie sur différents horizons de temps.

Au bout de combien de temps la France toute seule consommerait toutes les réserves disponibles de charbon, pétrole, gaz et lignite soit 884,4 Gtep ? Si nous faisons le calcul habituel c'est-à-dire qu'on diviserait les réserves par la consommation actuelle de la France nous trouverions :

$884\,400 \text{ Mtep} / 265,8 \text{ Mtep} = 3327$  ans ce qui paraît confortable à condition d'attribuer tout le combustible fossile traditionnel à la France. Mais si nous tenions compte d'une croissance de la consommation de 1,01% par an, la formule permettant de calculer cette durée deviendrait :

$\text{Ln} ((884000 * 0,0101 / 265,8) + 1) / 0,0101 = 350,85$  ans où Ln désigne le logarithme népérien. Là c'est déjà beaucoup moins confortable !

Soyons plus réaliste et remplaçons la consommation de la France par celle du monde (12002,4 Mtep) et le taux d'accroissement de la consommation d'énergie Français par celui du monde (2,26%). La formule devient :

$\text{Ln} ((884000 * 0,0226 / 12002,4) + 1) / 0,0226 = 43,4$  ans contre 73,65 si l'on faisait le calcul classique qui ne tient pas compte de la croissance de la consommation.

## Conclusion

Une telle consommation d'énergie, au niveau mondial, n'est évidemment pas possible si on se limite aux combustibles fossiles traditionnels, car les contraintes de pénurie se feront sentir bien avant l'épuisement complet des ressources. Même à court terme cette évolution de la consommation ne peut s'envisager que si nous réussissons rapidement à utiliser les énergies représentées dans le graphique de la Figure 2 (Uranium et Thorium en réacteur surgénérateur).

A plus court terme se pose le problème de la disponibilité du pétrole. La loi exponentielle appliquée au pétrole fait émerger l'impasse dans laquelle nous sommes. Le pétrole conventionnel a déjà commencé sa décroissance et le pétrole disponible pour l'OCDE, tous liquides confondus aussi. Or si l'économie est sensible à la quantité d'énergie disponible, on a vu qu'elle était encore plus sensible au pétrole qu'aux autres formes d'énergie.

S'il faut donc améliorer l'indice énergétique du PIB, il faut plus encore améliorer l'indice pétrolier du PIB pour rétablir la santé de l'économie. L'approche permettant de gérer le court terme et le plus long terme pourrait être la suivante :

- Mettre au point un véhicule consommant peu et inciter à son utilisation par des mesures coercitives (par exemple triplement du prix des carburants) et des primes (du genre prime à la casse de 10 000€).
- Accélérer la mise au point de filières nucléaire intrinsèquement sûre et surgénératrice afin d'élargir les réserves d'énergie disponibles.
- Mettre au point les procédés qui autorisent la substitution du pétrole par une autre énergie, avec pour objectif de le remplacer à terme par du nucléaire.

### ***L'énergie électrique***

L'électricité est une énergie qui ne se stocke pas. Pourtant la demande est variable selon les saisons ou les heures de la journée. Pour répondre à cette demande il faut disposer de moyens diversifiés et complémentaires, pour optimiser la production à chaque instant par rapport à la consommation des clients.

On distingue l'électricité "en base" et l'électricité "de pointe". L'électricité "en base" correspond à celle que l'on doit assurer continûment avec des moyens produisant à faible coût mais qui ont en général une grande inertie, tandis que l'électricité "de pointe" correspond à la production supplémentaire qui doit être assurée à certaines heures ou certains jours. Les moyens utilisés pour produire l'électricité de pointe doivent pouvoir monter rapidement en production et sont en général plus coûteux.

Le parc de production d'électricité est composé de centrales nucléaires, hydrauliques et thermiques (charbon, fioul, gaz) complété par l'éolien, le solaire et les autres énergies renouvelables.

### **Le Charbon et le Gaz**

Les centrales thermiques (fioul, charbon ou gaz) sont essentiellement sollicitées durant les périodes de consommation "de pointe". En effet, 12 à 20 minutes suffisent pour qu'une turbine à combustion produise à pleine puissance.

La production thermique s'oriente vers l'utilisation de centrales à cycles combinés gaz (CCG). Les CCG, sont capables de produire de l'électricité en moins d'une heure, et peuvent répondre aux fluctuations des besoins en électricité. Ils sont plus respectueux de l'environnement, par rapport aux centrales thermiques classiques, en raison de l'utilisation du gaz naturel, qui produit moins de CO<sub>2</sub>, et de leur meilleur rendement.

### **Le Nucléaire**

En période de consommation normale, les centrales nucléaires sont utilisées "en base", pratiquement tout au long de l'année. Après son démarrage, un réacteur nucléaire a besoin de plusieurs heures de fonctionnement avant de produire les premiers KWh. La puissance du réacteur peut être modulée de 10% à peu près si l'on veut éviter un empoisonnement du cœur. Les nouveaux réacteurs tels que l'EPR seront capable d'une plus grande flexibilité de ce point de vue.

## **L'hydraulique**

Les centrales hydrauliques regroupent différents types d'usines. Les installations au "fil de l'eau", produisent de l'électricité en continu "en base". Les barrages stockent de l'eau et disposent d'une réserve utilisable pour répondre à une consommation "de pointe". Par exemple, en période de pointe, un barrage peut produire 1 800 MW, soit l'équivalent de la production de deux réacteurs nucléaires, en l'espace de 10 minutes. En année d'hydraulicité normale, la part de l'hydraulique dans la production française est de l'ordre de 10 %.

## **Les renouvelables**

L'éolien et le solaire complètent ces moyens de production. L'aspect intermittent de cette dernière production limite à 20% la part de ces énergies dans le réseau qui est en effet conçu pour accepter l'intermittence des consommations. Mais au delà de 30%, il faut augmenter les moyens capables de fournir de l'électricité "de pointe" en introduisant des STEPs ou de l'électricité effaçable ou des centrales thermiques. Les autres solutions pour gérer l'intermittence demande la mise au point de nouvelles technologies qui n'ont pour l'instant jamais été testées à grande échelle : le stockage massif d'électricité, les réseaux intelligents interconnectés, les lignes électriques supraconductrices.

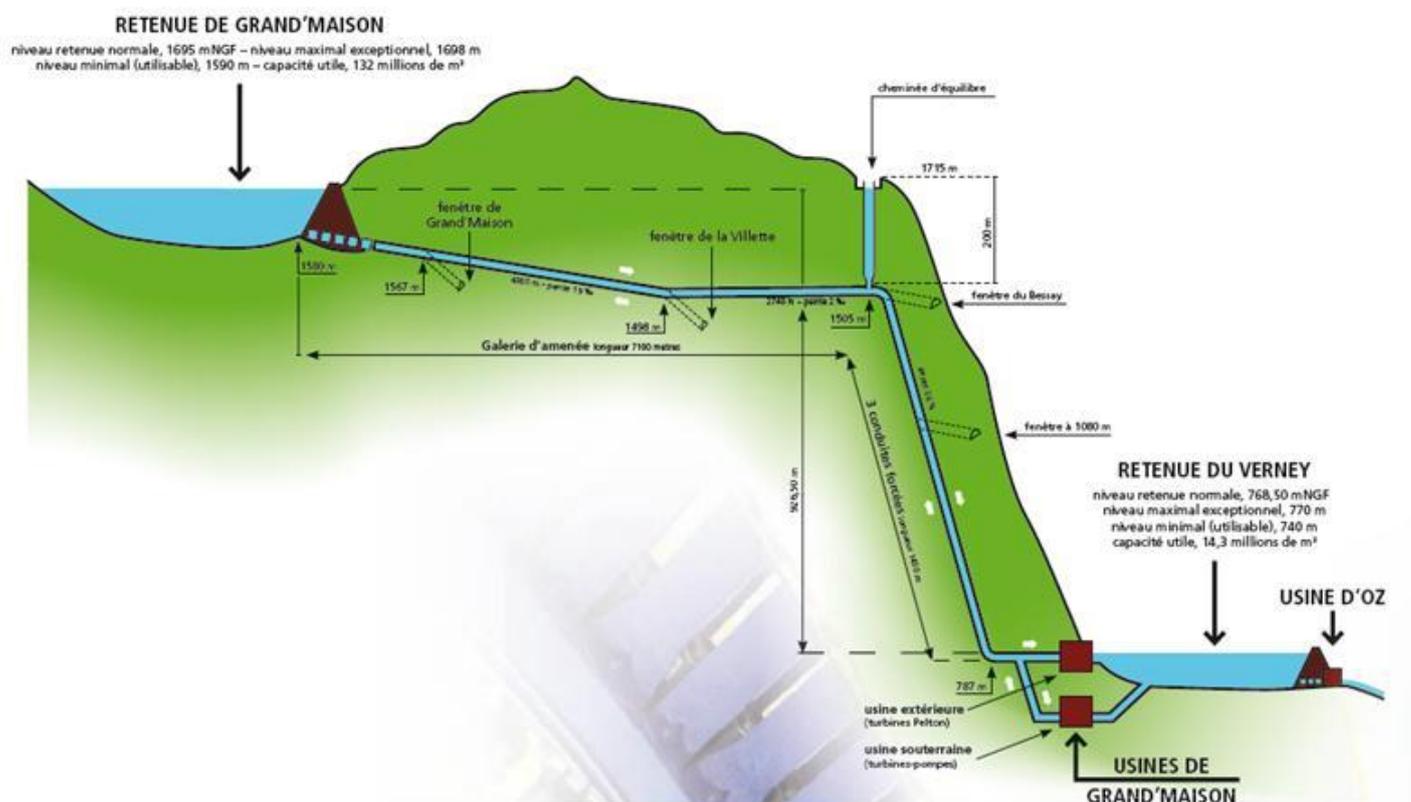
## **Les STEPs**

STEP signifie Station de Transfert d'Energie par Pompage. C'est l'un des rares moyens de stocker l'énergie électrique en quantité significative et avec de bons rendements (jusqu'à 82%). Il existe deux types de STEP, un que l'on appellera "terrestre" et l'autre "marin".

Il y a en France six installations hydroélectriques terrestres qui peuvent fonctionner en STEP. Le principe de ces installations est d'utiliser deux bassins avec un dénivelé important entre les deux, pour produire de l'électricité classiquement quand elle est coûteuse, et pour turbiner de l'eau du bassin inférieur au bassin supérieur pendant les heures creuses, afin de reconstituer une réserve pour la prochaine période de pointe.

On y perd 18% de l'énergie. Mais si on se réfère au tarif TEMPO d'EDF la valeur du kwh présente un écart de l'ordre de 1 à 10 entre les périodes creuses (0,0572€/kwh) et les périodes de pointes (0,5157€/kwh).

Un exemple typique de ce genre d'installation est la centrale de Grand'Maison .

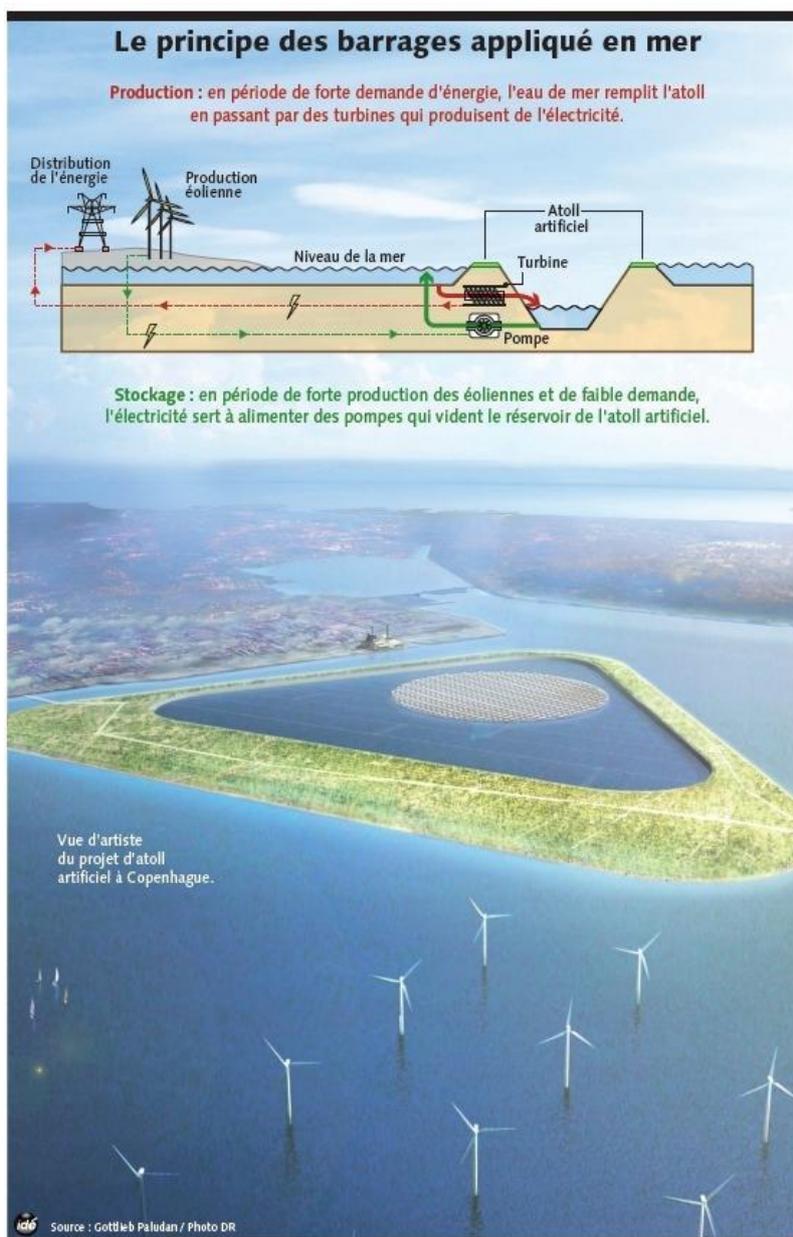


**Figure 11 le STEP de Grand'Maison**

L'intérêt principal d'un STEP est de régulariser l'offre et la demande sur le réseau public. Mais il peut aussi contribuer à la sécurité de l'approvisionnement car il n'a pas besoin d'être localisé près des centres de production et il peut être judicieux de l'installer près d'un centre de consommation, en particulier lorsque les interconnexions sont un peu faibles. C'est le cas en région PACA et en Bretagne, et dans les deux cas on est au bord de la mer. On peut alors construire un STEP marin ou utiliser le relief assez prononcé, et proche de la mer, pour faire un STEP terrestre utilisant la mer comme bassin inférieur.

Pour ce qui est des STEP marins il s'agit seulement de propositions, en particulier de Monsieur François Lemprière, sans que des installations opérationnelles aient été construites.

Il s'agit dans ce cas de construire un Atoll artificiel qui crée un dénivelé de l'ordre de 100 mètres entre le niveau de la mer et la réserve d'eau sur l'Atoll. Une illustration de ce concept est montrée sur l'image de la Figure 12 suivante :

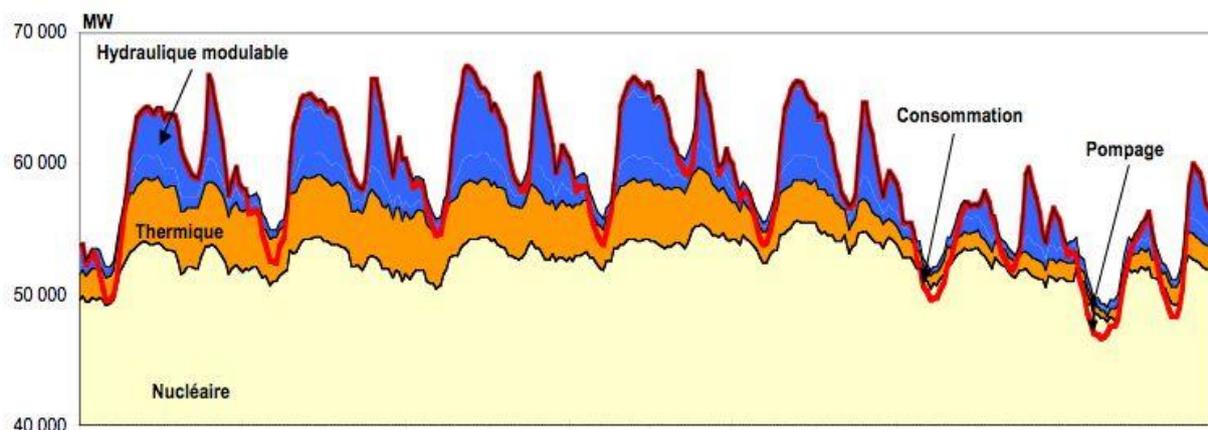


**Figure 12 : Le principe des barrages appliqués en mer<sup>10</sup>**

### L'électricité effaçable

La consommation et donc la production de l'électricité est variable au cours du temps : il y a des variations dues aux saisons et des variations en fonction des jours de la semaine et de l'heure. A titre d'exemple le graphique de la Figure 13 montre la consommation d'énergie électrique en France au cours d'une semaine typique en hiver

<sup>10</sup> <http://a21.idata.over-blog.com/1/23/41/67/Liberty8/potentiel--olien-monde.jpg>



**Figure 13 : Consommation électrique en France (semaine typique) en hiver<sup>11</sup>**

Ce graphique, qui montre surtout la partie variable de la production, permet de se faire une idée de ses variations et des coûts associés en termes de capital et en termes de rejets de CO<sub>2</sub>. L'électricité lors des pointes coûte beaucoup plus cher car on utilise des installations spéciales qui peuvent démarrer vite et qui sont rentabilisées que sur une partie du temps.

L'idée de l'électricité effaçable consiste à arrêter une installation plutôt que de démarrer de la production. C'est la même idée que les tarifs jour/nuit bien connus de tous les propriétaires d'un chauffe-eau électrique. Le tarif pourrait être encore plus avantageux si le bouton Marche/Arrêt était chez EDF. On a même imaginé que les véhicules électriques branchés pour leur recharge pourraient servir de réserve électrique d'appoint pour gérer les pointes de charge.

On peut aller plus loin en concevant pour certains usages, des installations consommatrices d'électricité, largement automatisées, conçue pour pouvoir s'arrêter et redémarrer facilement. Cela donnerait un volant d'électricité à couper, utilisable pour gérer les pointes.

### ***Les économies d'énergie***

Les économies d'énergie sont unanimement plébiscitées comme un moyen prioritaire de gestion de notre situation énergétique. On a vu que la disponibilité des énergies fossiles était insuffisante, au contraire de l'énergie accessible au moyen de la surgénération. On a vu aussi que l'économie était sensible à l'énergie disponible et plus encore au volume de pétrole disponible. Dans ces conditions il faut encourager les mesures qui favorisent les économies d'énergie fossiles et en particulier les mesures qui économisent le pétrole. La seule objection sérieuse à cette approche concerne le coût des mesures proposées par rapport aux gains qui en sont espérés.

Le chauffage au gaz et au fioul représente, chaque année en France, environ 20% de la consommation d'énergie, 15 milliards d'euros d'importations de pétrole et de gaz, et 20% des émissions de gaz à effet de serre. C'est un secteur où les économies d'énergie sont pertinentes de même que l'utilisation de pompes à chaleur.

<sup>11</sup> <http://www.manicore.com/documentation/hydro.html>

Ce qui caractérise les énergies fossiles c'est qu'elles émettent du gaz carbonique. Celui-ci risque d'avoir une action néfaste sur le climat, et pour cette raison des approches visant à minimiser son émission ont vu le jour. Le fait de vouloir relâcher la contrainte que l'énergie fossile impose à l'économie du fait de sa rareté prévisible, et le fait de vouloir minimiser les émissions de gaz carbonique vont dans le même sens.

Pour classer par ordre de priorité les mesures d'économie d'énergie, on pourra, en première approximation, calculer le coût de la tonne de gaz carbonique évitée et favoriser les mesures les moins coûteuses par rapport aux gains attendus. Ainsi pour réduire la consommation liée au chauffage il faudra, pour chaque bâtiment, étudier les possibilités d'isolation et de remplacement du mode de chauffage en favorisant les mesures qui minimisent le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée.

La pénurie énergétique nous place déjà dans une situation économique défavorable, alors que sa résolution nécessite des investissements lourds qui sont plus facile lorsque la situation est meilleure. En conséquence, en deuxième approximation il faudrait favoriser les actions qui améliorent la balance du commerce extérieur, le taux de chômage et l'état des comptes publics.

Cette approche ne distingue pas le cas de l'énergie nucléaire de celui des énergies renouvelables. En effet il s'agit bien de faire des économies de consommation de pétrole ou plus largement des économies d'énergie fossile et non pas seulement des économies d'énergie.

La contrepartie de ce positionnement c'est qu'il faut accepter de payer le coût de la sécurité, dans le nucléaire, et se donner des objectifs ambitieux dans ce domaine. Ainsi, si la sécurité, évaluée à son juste coût, rend le nucléaire non concurrentiel, cela se traduira dans le prix de la tonne de gaz carbonique évité et cela diminuera la priorité de la mesure envisagée.

### ***Les propositions***

Les propositions suivantes ont pour but de diminuer notre dépendance aux énergies fossiles. La pénurie la plus proche étant celle du pétrole, il y a une certaine urgence à mettre en œuvre les mesures qui diminuent cette consommation. Bien que cela soit une retombée positive à ne pas négliger, le but n'est pas de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, pourtant le volume des rejets est un bon indicateur du niveau de l'effort déjà réalisé et on pourra l'utiliser pour optimiser l'aspect économique du plan mis en œuvre.

1. On devrait étudier le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée chaque fois qu'on décide d'une mesure afin de minimiser le coût global pour un même niveau de rejet
2. Il faudrait produire du pétrole de synthèse.
3. Il faudrait mettre au point un véhicule à faible consommation (de l'ordre de 1.5 l au 100) léger (de l'ordre de 500 kg), d'une puissance limitée (de l'ordre de 30cv) et de performance modeste (110 km/h max).
4. Il faudrait inciter à l'utilisation du véhicule économe par des mesures coercitives (par exemple triplement du prix des carburants) et des primes (du genre prime à la casse par échange gratuit entre un ancien véhicule et un véhicule économe neuf).

5. Il faudrait mettre au point les procédés qui autorisent, chaque fois que cela est possible, la substitution du pétrole par une autre énergie, avec pour objectif de le remplacer à terme par de l'électricité.
6. Il faudrait améliorer le pourcentage de pétrole récupérable sur les sites déjà connus.
7. Il faudrait mettre en exploitation les pétroles non conventionnels (Pétroles lourd, sables bitumeux...).
8. Il faudrait développer des procédés pour transformer du gaz en liquide.
9. Il faudrait produire des combustibles liquides à partir du charbon, des "oil shale", de la biomasse et de toutes les formes d'énergie non fossile.
10. Il faudrait taxer le carbone.
11. Il faudrait économiser l'énergie dans les bâtiments.
12. Il faudrait améliorer l'indice énergétique du PIB et favoriser les transports en commun.
13. Il faudrait augmenter la production d'électricité renouvelable.
14. Il faudrait augmenter la production d'électricité nucléaire.
15. Il faudrait améliorer les réseaux électriques afin qu'ils acceptent l'intermittence plus facilement.
16. Il faudrait favoriser des installations qui consomment de l'électricité effaçable.
17. L'électricité intermittente ne devrait pas être rachetée plus chère que l'électricité garantie pour ne pas mettre les contraintes de l'intermittence à la charge de quelqu'un d'autre.
18. Il faudrait rendre les centrales nucléaires existantes plus sûres afin de pouvoir continuer à les utiliser.
19. Il faudrait accélérer la mise au point de filières nucléaire intrinsèquement sûre et surgénératrice afin d'élargir les réserves d'énergie disponibles.
20. Il faudrait remplacer le gaz et le fioul de chauffage des bâtiments par de l'isolation, des pompes à chaleur, et de la biomasse en minimisant le prix de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée.
21. Il faudrait électrifier l'industrie productrice de matériaux de base : ciment, acier, chimie, métallurgie des non ferreux, papier-carton. Pour cela il faut fournir de l'électricité à un prix compétitif et augmenter l'efficacité énergétique des processus industriels.
22. Il faudrait conserver une industrie manufacturière locale.

## ***Les objections***

***Objection 1 : Il faudrait remplacer le nucléaire par des énergies renouvelables et des économies d'énergie.***

## Réponse<sup>12</sup>

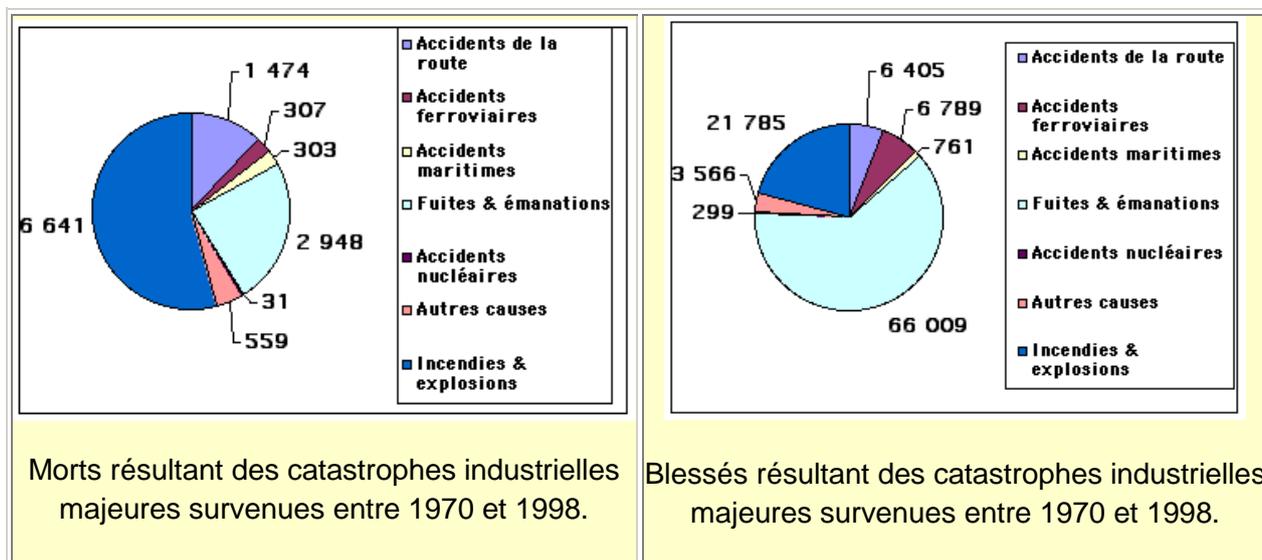
Le nucléaire suscite beaucoup d'oppositions pour trois raisons principales :

1. Les catastrophes nucléaires de Three Mile Island, de Tchernobyl et de Fukushima ont fait perdre confiance dans la sûreté des centrales.
2. La gestion des déchets nucléaires ne satisfait pas les opposants.
3. Le coût du nucléaire est perçu comme sous évalué en particulier du point de vue du coût du démantèlement des centrales.

Pour répondre au premier point il faut considérer la probabilité de ces accidents ainsi que les dommages subits en termes de pertes humaines et de blessés et en termes de coût de ces catastrophes. Afin de déterminer si le nucléaire est plus dangereux que nos autres activités et si les risques qu'il nous fait courir sont disproportionnés par rapport aux bénéfices.

Or le Programme des Nations Unies pour l'Environnement a recensé les accidents industriels majeurs survenus entre 1970 et 1998. On entend par "accident industriel majeur" tout événement qui a fait plus de 25 morts à bref délai, 125 blessés, 10 000 évacués ou 10 M\$ de dégâts.

La Figure 14: Conséquences des catastrophes industrielles majeures présente la répartition des morts et blessés par cause, sachant que Tchernobyl est inclus, mais que par contre que les morts survenus dans les mines de toute nature n'y sont pas, non plus que les décès dus aux ruptures de barrages.



**Figure 14: Conséquences des catastrophes industrielles majeures survenues entre 1970 et 1998.<sup>13</sup>**

<sup>12</sup> Cette réponse s'inspire très largement du site de J.M.Jancovici : [http://www.manicore.com/documentation/articles/idee\\_nucleaire.html](http://www.manicore.com/documentation/articles/idee_nucleaire.html)

<sup>13</sup> Source Nations Unies

Alors que l'extraction du charbon en Chine fait quelques milliers de morts par an soit plus de 50000 morts sur la période, les accidents liés au nucléaire civil ont fait quelques dizaines de "morts immédiats" en 30 ans.

Dans le même temps, les raffineries, oléoducs et les fabriques de feux d'artifice en ont tué quelques milliers, l'industrie chimique au moins autant.

La bonne question ne semble donc pas être de savoir si le nucléaire "est dangereux", mais s'il est plus ou moins dangereux que les autres modes de production d'électricité par lesquels il faudrait partiellement le remplacer.

Pour cette question, voici la conclusion de l'Organisation Mondiale de la Santé.

Mode de production	Morts par GW électrique par an,
Charbon	1,3 à 17
Pétrole	1,5 à 11,1
Nucléaire	0,3 à 3

**Tableau 7: Dangérosité de la production d'électricité<sup>14</sup>**

Ce tableau indique les morts par GW de puissance installée et par an en conditions normales d'exploitation, selon le type d'énergie primaire. Ces chiffres tiennent compte de l'exposition aux radiations des travailleurs du nucléaire dans un contexte normal, et on peut donc dire que le nucléaire n'est pas plus dangereux que les autres modes de production de l'électricité qui pourraient le remplacer.

Pour répondre aux autres points qui sont tous liés à des questions de coûts des externalités du nucléaire, nous proposons de définir une approche correcte de la gestion du problème et d'en évaluer le coût.

Les externalités du nucléaire sont liées aux déchets de haute activité qu'il faut gérer ou éliminer, au démantèlement qu'il faut correctement provisionner et aux risques d'accidents qu'il faut minimiser et provisionner.

Pour ce qui concerne la gestion des déchets et le démantèlement, EDF, le CEA et AREVA font des provisions, mais le montant de ces provisions est régulièrement contesté. L'OCDE donne une estimation indépendante dans son rapport Perspective de l'énergie nucléaire 2008 le coût de ces activités serait de 3% du coût de l'énergie électrique produite.

Pour donner un ordre de grandeur supposons que l'on calcule le coût de la gestion des déchets et du démantèlement d'une centrale de 1 GW. Elle produira chaque année 1GW pendant 8000 heures pendant 40 ans. Cela fait 320 000 GWh avec 1 Kwh à 5 centimes d'euro (coût de production à ne

<sup>14</sup> Source : Nuclear Power and Health, World Health Organization, 1994

pas confondre avec le prix de vente) cela fait une somme de 16 Milliards €. Les provisions devraient donc représenter 3% de ce montant soit 480 millions.

Or le coût historique de construction du parc actuel (coût p20 du rapport) de centrales nucléaires est de 1,165 Milliards (en € 2010) par Gigawatt et EDF provisionne 15% du prix de construction par centrale soit 100% de la partie nucléaire ce qui donne pour un GW 175 Millions € 2010. Il manque donc un montant de 305 millions soit 1,9 % du coût de l'électricité produite.

Restent les risques d'accidents. La cour des comptes vient d'évaluer les coûts du nucléaire dont le coût des assurances qui seraient nécessaires pour couvrir le risque des accidents nucléaires. Elle se fonde sur un coût d'accident de 70 Milliards d'euros pour calculer un pourcentage du prix de l'électricité à verser sur un compte pour constituer une réserve. Ce montant est déjà contesté aussi on le remplacera par une estimation japonaise (non complaisante) du coût probable du désastre de Fukushima. Le montant à prendre en compte devient alors 250 Milliards de dollars sachant que les évaluations vont de 71 à 250 Milliards.

Dans ces conditions on peut reprendre les calculs de la cour des comptes et les appliquer au nouveau montant des dommages dus à l'accident, on trouve qu'il faudrait verser 5€ par MWh soit 12,5% du tarif de l'accès régulé à l'électricité nucléaire historique (prix de vente en gros aux concurrents d'EDF)

Si donc on devait prendre en compte cette réévaluation des risques il faudrait augmenter les tarifs de l'électricité de 1,9% pour le démantèlement et de 12,5 % pour les risques d'accidents soit 14,4% en tout. Ce niveau d'augmentation n'empêche pas le nucléaire de rester l'un des modes de production de l'électricité les moins chers.

Il ne semble donc pas prioritaire de remplacer le nucléaire par des renouvelables et des économies d'énergie. On appliquera plutôt la mesure 1 pour choisir l'ordre des priorités des investissements en ayant d'abord majoré de 15% le prix de l'électricité.

### **Reformulation**

La mesure n° 14 peut être reformulée ainsi :

Dans la mesure où c'est économiquement justifié, il faudrait augmenter la production d'électricité nucléaire. Le coût de cette électricité doit prendre en compte les améliorations de la sûreté de fonctionnement, le coût du démantèlement, le coût de la gestion des déchets ce qui majore le prix actuel d'un minimum de 15%.

### **Objection 2 : *On ne peut pas augmenter le prix des carburants sans pénaliser les plus pauvres***

#### **Réponse**

Un des moyens politiques de faire baisser les rejets de gaz à effet de serre est de mettre en œuvre des taxes afin que l'optimisation attendue des marchés minimise de tels rejets comme conséquence de la recherche d'un avantage économique. Parmi les taxes envisagées, la taxe carbone qui est une sorte de TVA assise sur le contenu "carbone" des biens taxés, est la plus souvent citée.

Une telle taxe est difficile à appliquer car il y a plusieurs sortes de résistances et d'obstacles à franchir :

- Cet impôt ne serait pas "progressif" ce qui scandalise les syndicats,
- Les règlements Européens et de l'OMC limitent l'inventivité en matière de nouvelles taxes.

On se propose :

1. d'étudier une approche économique pour améliorer les prélèvements qui financent nos dépenses communes,
2. de montrer quels sont les difficultés que l'on peut rencontrer au niveau européen,
3. et de définir les principes de mise en œuvre d'une taxe carbone.

### ***Approche Economique***

On va d'abord étudier la TVA pour analyser s'il est possible d'introduire une TVA sociale puis on examinera dans le dernier paragraphe l'intérêt d'une taxe carbone.

#### **TVA**

La TVA a une certaine forme de progressivité du fait de l'existence de plusieurs taux. Si l'on veut favoriser les plus pauvres il suffira d'appliquer un taux réduit aux biens qu'ils achètent habituellement. On peut en plus pénaliser les plus riches en appliquant un taux majoré aux produits les plus chers. Cette progressivité n'est pas aussi forte que celle que permet l'impôt sur le revenu, mais en théorie elle pourrait l'être car le taux réduit pourrait être nul.

#### **TVA Sociale**

L'idée est de remplacer une partie des cotisations sociales qui s'appliquent aux salaires par une augmentation de la TVA. En France les cotisations sociales sont payées en partie par l'employeur et en partie par l'employé. Le total représente en moyenne 55% du salaire dont 13% à la charge de l'employé. L'ensemble des prélèvements sociaux français s'élève à € : 300 milliards à peu près.

Comme il est difficile de faire confiance aux entreprises pour répercuter complètement, à la baisse, une diminution de leurs charges sociales, on propose de diminuer la part salariale de 1% chaque fois qu'on augmente la TVA de 1%. Pour les salariés et assimilés les deux mesures se compensent et on verra plus loin l'effet sur les autres personnes. Pour l'état 1% de TVA représente 6,9 milliards € et 1% de cotisations sociales 5,5 milliards €, il y a donc un gain de 1,4 milliards € par an. Ce gain se rapporte aux produits importés qui ne payent pas de charges sociales mais qui payent la TVA.

Mais d'où vient l'argent ? Il faut bien comprendre que les salaires ne représentent pas toutes les rémunérations, il y a aussi la rémunération des capitaux sous forme d'intérêt (~350 milliards €) ou de partage des résultats (~250 milliards €). Les 1,4 milliards € viennent essentiellement de la partie consommée de cette rémunération du capital.

Que les riches payent plus ne fera de la peine qu'aux riches, mais qu'en est il des plus pauvres ? Il est certain qu'ils ne supportent pas tous des prélèvements sociaux ce qui augmente l'impact des mesures proposées sur eux. Il y a deux moyens pour le compenser : augmenter les indemnités sociales dont ils bénéficient ou baisser le taux réduit de la TVA (ce qui dans notre contexte signifie l'augmenter moins que le taux normal et que le taux majoré).

On a 13% de part salariale du point de vue des prélèvements sociaux. Si on applique la mesure jusqu'à supprimer la part salariale des cotisations sociales l'état peut faire un bénéfice de  $1,4 \times 13 = 18$  milliards par an environ : c'est 1% de PIB de déficit budgétaire qui pourrait être comblé ! Mais la mesure devrait être introduite graduellement sur 6 ou 7 ans par exemple.

### ***Contraintes européennes***

Le problème que pose l'Europe c'est que ses institutions ne sont pas démocratiques. En effet la commission européenne qui a beaucoup de pouvoir n'est pas élue et applique bureaucratiquement des règles qui mériteraient l'aval des populations. Il y a deux notions antagonistes en Europe : le principe de subsidiarité et le principe d'harmonisation. Par exemple en matière fiscale le principe de subsidiarité permet à l'Irlande d'avoir un taux d'imposition des entreprises qui est un cas avéré de dumping fiscal alors que le principe d'harmonisation limite la liberté de fixation des taux de TVA.

Pour revenir à notre TVA sociale, on pourrait multiplier les taux afin d'introduire une meilleure progressivité de cet impôt, mais on se heurte alors à la rigidité des règles européennes.

### ***TVA Carbone***

En supposant résolus les problèmes générés par la bureaucratie européenne, peut on encore améliorer la TVA sociale ? Si on veut sortir du fossile, avant que celui-ci ne disparaisse naturellement, il semble logique d'instaurer une taxe carbone. On pourrait l'appeler TVA carbone et celle-ci aurait pour vocation de se substituer partiellement à la TVA sociale que l'on a décrite précédemment. Là encore on pourrait penser que les pauvres vont être défavorisés mais en fait il n'en est rien car les émissions carbonées associées à leur consommation est bien plus faible que celle des classes moyennes et supérieures. Par exemple le carbone inclus dans la nourriture n'a pas à être taxé car toutes les productions de la nature sont compensées par la photosynthèse (sinon il

faudrait taxer la respiration !), ils utilisent beaucoup plus les transports en commun, ont des habitations plus petites etc.

Il faudrait donc estimer le contenu carbone de chaque produit pour le taxer et compenser les recettes supplémentaires que cela entraîne par une baisse moyenne de la TVA. On peut taxer de plus en plus le carbone jusqu'à ce que le taux de la TVA réduite soit égal à zéro. La méthode est neutre pour le gouvernement mais il est vraisemblable que les produits consommés par les riches seront plus taxés que les autres, ce qui est un effet favorable.

Après un certain temps, il est probable que les comportements changent et que la TVA carbone produise moins de revenus. On pourra alors augmenter légèrement la TVA sociale pour compenser.

### **Reformulation**

La mesure n° 10 peut être reformulée ainsi :

Il faudrait repenser la TVA et mettre en œuvre une fiscalité qui pénalise l'utilisation du carbone, qui améliore les rentrées fiscales et qui ne pénalise pas les plus pauvres. Cette fiscalité pourrait venir en déduction de la part salariale des prestations sociales, s'appliquer prioritairement aux produits de luxe et épargner les produits de première nécessité.

### **Objection 3 : *Il faudrait limiter ou supprimer les déchets du nucléaire***

#### **Réponse**

Il y a beaucoup de déchets qui sont aussi dangereux que les déchets nucléaires et qui sont produit en grande quantité sans que leur gestion soit envisagée. On peut citer par exemple certains pesticides qui sont même répandus avec des moyens aériens.

Mais ce n'est pas parce que l'on a des faiblesses dans certains domaines qu'il faut négliger de traiter celui qui nous occupe.

L'enfouissement dans des sites stables géologiquement est la solution préconisée actuellement, mais l'idéal serait de détruire ces déchets. Or un des avantages des filières surgénératrices, outre qu'elles étendent le stock d'énergie disponible, est qu'elles rendent possible "l'incinération" des déchets des centrales de premières générations.

A titre d'exemple on pourrait développer plus rapidement des filières de réacteurs hybrides, consommant des combustibles fertiles comme l'Uranium 238 ou le thorium 232 et comportant une sécurité améliorée.

### ***La filière Thorium***

La très grande majorité des réacteurs en service fonctionne selon un cycle fondé sur l'Uranium. L'Uranium 235 est fissile alors que l'Uranium 238 est fertile car il est capable de capturer un neutron pour se transmuter en Plutonium 239. On a donc deux éléments fissiles, un qui est naturel, l'Uranium 235, et un qui est artificiellement produit dans les réacteurs, le Plutonium 239. Ces

deux éléments fissiles sont utilisés pour produire de l'énergie, l'Uranium le plus souvent, et le Plutonium dans quelques installations expérimentales à spectre rapide ou pour constituer du MOX utilisable dans certains réacteurs à spectre thermique.

Le Thorium 232 est également fertile, il peut capturer un neutron pour donner de l'Uranium 233 qui est fissile. Peut-on fonder sur lui une filière nucléaire intéressante? On va montrer que la réponse est positive :

- D'abord le Thorium est plus abondant que l'Uranium dans un rapport 3 à 4.
- Son numéro atomique est plus faible et de ce fait il produit moins d'actinides mineurs ce qui rend ses déchets plus faciles à gérer.
- Les résidus miniers du Thorium posent beaucoup moins de problèmes que ceux de l'uranium.

Toutefois, comme pour l'Uranium 238 on ne peut l'utiliser qu'en amorçant la réaction avec une charge de matériaux fissile soit de l'Uranium 235, du Plutonium 239 ou de l'Uranium 233. Sachant qu'à ce jour on ne dispose pas du dernier élément pour constituer une charge.

Il y a alors deux possibilités principales : la première c'est d'utiliser des surgénérateurs comme avec l'Uranium 238, on choisira alors de préférence une charge de Pu 239 pour amorcer le cycle, afin d'éviter la production d'actinides mineurs liés à la présence d'Uranium 238 en cas de charge de type Uranium. La deuxième ce sont les réacteurs à neutrons thermiques à sels fondus.

Dans le premier cas on va consommer plus de plutonium que dans les filières classiques et produire de l'Uranium 233, qui sera consommé à son tour. L'avantage sur les déchets produits, bien que significatif, ne sera pas considérable. Par contre l'utilisation dans des réacteurs à sel fondus minimise la charge nécessaire pour initialiser le cycle et minimise aussi la production d'Uranium 232 qui est le déchet le plus gênant du cycle thorium (à cause de sa transformation en TI 208 qui est très radioactif).

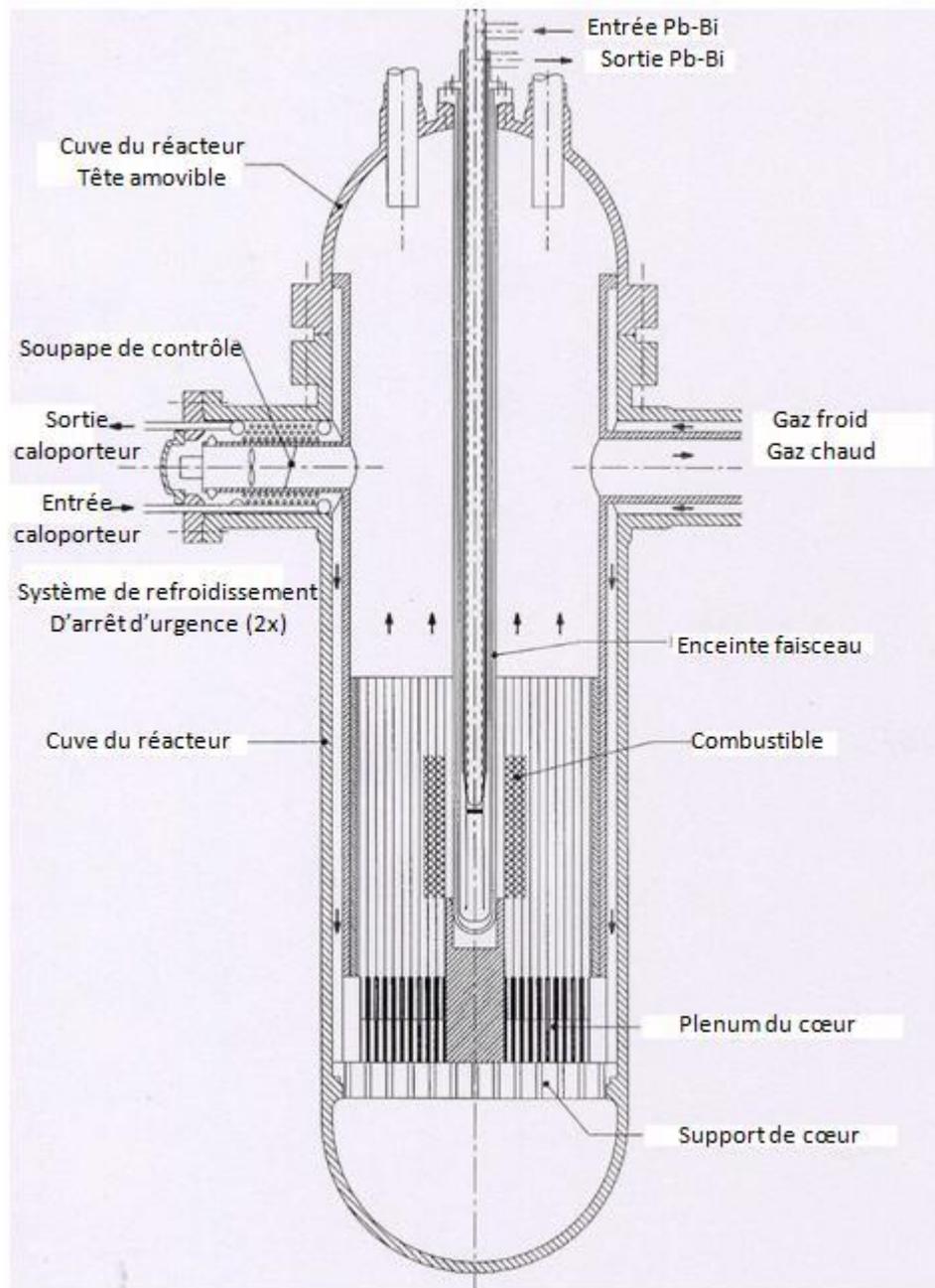
Cette filière peut fonctionner en mode critique si la charge et la géométrie de la matière fissile sont adaptées et en mode sous critique, si on le souhaite. Dans ce dernier cas il faudra adjoindre une source artificielle de neutrons pour que la réaction ait lieu (réacteur hybride).

Ce dernier type de réacteur est le plus intéressant du point de vue de la gestion des déchets : on se propose de les présenter avant de montrer comment on pourrait les utiliser pour rendre le nucléaire relativement durable et propre.

### ***Les réacteurs Hybrides***

Ce type de réacteurs ne fait pas partie de la génération 4 car il est considéré comme arrivant à maturité après 2030. Mais il pourrait y arriver peu de temps après si on y met un peu de priorité. Il est intrinsèquement plus sûr car il est sous critique et a besoin d'une source séparée de neutrons pour fonctionner. Si on arrête la source de neutrons, le réacteur ralentit et s'arrête aussi. Il ne peut donc pas s'emballer suite à une défaillance.

Le dessin ci-dessous, est issu de la thèse de Denis Kerdraon, et représente un exemple de réacteur hybride à combustible solide proposé par Framatome<sup>15</sup> :



**Figure 15 : Schéma de principe d'un réacteur hybride**

Il s'agit d'un réacteur à spectre de neutrons rapides utilisant des combustibles solides, tels que ceux développés pour les surgénérateurs, avec un module de spallation doté d'une cible liquide en alliage de plomb-bismuths et utilisant un caloporteur gaz (hélium) pour le massif sous-critique. Mais il est aussi possible d'avoir le même genre de réacteur avec une charge de combustible de

<sup>15</sup> <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/documents/theseDKerdraon.pdf>

type sels fondus (RSF). Les réacteurs hybrides n'ont que des avantages, on peut les charger en actinides mineurs sans compromettre la sécurité car ils sont sous-critiques, mais ils ont un coût plus important du fait de leur complexité. En effet on peut considérer que le coût est grossièrement celui d'un réacteur plus classique auquel on additionne le coût de la source de neutrons. De plus l'accélérateur de protons doit être puissant et avoir une fiabilité qui limite le nombre de pannes à quelques unes par an, ce qui n'est pas gagné d'avance.

Le démarrage d'une filière RSF fondée sur le cycle thorium/uranium nécessiterait une période de transition en vue de la constitution d'un inventaire en U233 suffisant. Cette constitution serait assez longue, de l'ordre de vingt ans, en utilisant les réacteurs disponibles. On pourrait la réduire à cinq ans en utilisant un réacteur du type précédent, à neutrons rapides, pour constituer l'inventaire du réacteur à sels fondus à neutrons thermiques.

L'un des avantages des réacteurs à sel fondus, est qu'ils peuvent être surgénérateurs aussi bien avec des neutrons rapides qu'avec des neutrons thermiques. Ce type de réacteur pourrait aussi incinérer les actinides mineurs produit par les EPR et les REP ainsi que du plutonium.

En effet on peut démarrer les réacteurs à sel fondus avec une charge de plutonium plutôt qu'une charge d'uranium 233. Dans ce cas on produit plus de déchets, mais si on ne retire jamais les actinides mineurs du sel fondu, ils finiront par être tous incinérés. Cette approche peut être complétée par une autre mesure qui consisterait à remplacer l'uranium 238 par du thorium 232 autour du cœur des RNR afin de produire de l'uranium 233 par capture des neutrons rapides en lieu et place du plutonium. L'ensemble permettant une montée en charge plus rapide des RSF.

Si l'on ne souhaite pas une transition vers le cycle Thorium/Uranium, ce qui semble être le cas en France du fait de l'existant, on se dirigerait vers une définition du parc de réacteurs qui serait la suivante :

Pour la production d'énergie le parc est constitué de réacteurs REP chargés en combustibles UOX et MOX et de RNR qui permettent le multi-recyclage du plutonium seul. Par ailleurs il y aurait aussi des réacteurs hybrides pour incinérer les actinides mineurs et certains produits de fission à vie longue.

Si par contre on s'autorise une telle transition vers un cycle Thorium/Uranium, on pourrait remplacer les RNR par des RSF du cycle Thorium/Uranium, utiliser des réacteurs hybrides utilisant des combustibles solides pour constituer les charges initiales U233 et pour incinérer une partie des actinides mineurs produit par les REP historiques. Cette approche permettrait de laisser

s'éteindre petit à petit la filière des REP. Finalement il ne resterait plus que des réacteurs à sels fondus au thorium qui produisent peu de déchets.

### **Reformulation**

La mesure N° 5 peut être reformulée ainsi :

Dans la mesure où l'on saurait gérer ou détruire les déchets que la mesure entraîne, il faudrait mettre au point les procédés qui autorisent, chaque fois que cela est possible, la substitution du pétrole par une autre énergie, avec pour objectif de le remplacer à terme par de l'électricité.

La mesure N° 18 peut être reformulée ainsi :

Il faudrait rendre les centrales nucléaires existantes plus sûres et les rendre capables d'éliminer les déchets nucléaires, afin de pouvoir continuer à les utiliser.

### **Objection 4 : *La production de pétrole de synthèse rejette beaucoup de gaz carbonique***

#### **Réponse**

Effectivement la production de pétrole à partir du charbon rejette beaucoup de gaz carbonique, à partir du gaz beaucoup moins. Mais la meilleure approche de ce point de vue est d'utiliser de l'énergie nucléaire. On peut alors "hydrogéner" le charbon de manière propre ou même produire des carburants liquides à partir d'une source de gaz carbonique.

La problématique de la gestion des déchets est générale et doit être adressée. Eliminer le gaz carbonique, qui est un déchet, est donc pertinent. Mais la problématique prioritaire qui est traitée ici est celle que posent les pénuries probables d'énergies traditionnelles et la déplétion déjà amorcée du pétrole, qui est un des facteurs explicatif de la baisse de performance de l'économie, et dont les effets vont aller en s'amplifiant.

Il faut donc des mesures d'urgences pour contrecarrer cette évolution pour que les moyens soient disponibles qui permettent de traiter aussi les autres problèmes, dont les rejets de gaz carbonique.

#### **Exemple pratique**

A titre d'exercice pour donner un ordre de grandeur de coût et de rentabilité on se propose de décrire un projet qui aurait pour but de retirer le gaz carbonique de l'atmosphère à une échelle significative, afin de démontrer la faisabilité d'un retour, pour celle-ci, au taux pré industriel de CO<sub>2</sub>.

Il s'agit donc d'un démonstrateur sur lequel on peut se fonder pour extrapoler un dispositif réel capable d'atteindre l'objectif précédent. Le démonstrateur utilise l'énergie nucléaire excédentaire principalement la nuit. En fait on suppose que l'on utilise de l'électricité effaçable qui est donc moins chère que l'électricité garantie. On suppose que son prix est 50€ le MWh.

L'atmosphère est une source de gaz carbonique : l'idée est de construire une usine dont le but est de retirer le gaz carbonique de l'atmosphère pour fabriquer du carburant de synthèse. La vente du carburant de synthèse devant rentabiliser le projet. Cette approche est une contribution positive

pour résoudre le problème des rejets de gaz carbonique, au même titre que l'utilisation de la biomasse ou des biocarburants car il évite l'extraction correspondante de carbone fossile supplémentaire.

Le plan d'ensemble est le suivant :

- Construction d'une installation pour retirer le gaz carbonique de l'air ambiant
- Construction d'une installation pour électrolyser l'eau de mer
- Construction d'une installation de production de carburant de synthèse à partir du gaz carbonique et de l'hydrogène

### **Construction d'une installation pour retirer le CO<sub>2</sub> de l'air ambiant<sup>16</sup>**

On propose une installation, que l'on pourrait améliorer, encore expérimentale. La description du dispositif expérimental et la figure ci-dessous se trouvent dans le document référencé.



**Figure 16 : Installation pour retirer le CO<sub>2</sub>**

On en retiendra une valeur typique de l'énergie qu'il faut dépenser pour retirer le gaz carbonique de l'air : de l'ordre de 100 kWh électrique par tonne de CO<sub>2</sub>. Il faut aussi mobiliser 1m<sup>2</sup> de surface pour retirer 20 tonne de CO<sub>2</sub> par an.<sup>17</sup>

### **Construction d'une installation pour électrolyser l'eau<sup>18</sup>**

Le type de système envisagé est décrit dans la référence du titre.

L'énergie nécessaire est de l'ordre de 4.4 kWh/M<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (soit 90 grammes environ) avec une installation classique et moins si on utilise l'installation qui est présentée.

<sup>16</sup> <http://keith.seas.harvard.edu/papers/120.Khani.Heidel.Ferreira.Keith.Cherry.LowEnergyPackedTower-GHGT9.e.pdf>

<sup>17</sup> <http://www.geekmaispastrop.com/2008/10/capture-co2-ambient/>

<sup>18</sup> <http://www2.cnrs.fr/presse/communique/1570.htm>

On a extrait de la référence la figure suivante qui montre une installation qui a permis d'estimer les caractéristiques précédentes.



© AREVA NP/ IEM

**Figure 17 : Installation d'électrolyse**

### ***Construction d'une installation de production de carburant de synthèse***

L'installation est du genre Fischer-Tropsch mais au lieu de commencer la réaction par l'équation classique :



On a plutôt :



Il est bien évident que pour que la réaction ait lieu il faut rajouter de l'énergie, mais c'est le but de l'exercice d'arriver à stocker de l'énergie nucléaire sous forme de carburant tout en retirant du gaz carbonique de l'atmosphère.

Normalement une installation de type Fischer-Tropsch qui traite naturellement l'équation 1 devrait pouvoir traiter l'équation 2 moyennant quelques réglages, ce fait semble démontré par une expérience pilote rapporté dans le document Panorama des voies de valorisation du CO<sub>2</sub><sup>19</sup> de l'ADME § 2.1.4 de sa partie hydrogénation du CO<sub>2</sub>.

On pourrait aussi se ramener à l'équation 1 par les étapes suivantes :

- Avec un catalyseur à l'oxyde de nickel on fait la Méthanisation classique :  
 $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$  (équation 3) (Procédé Sabatier)

<sup>19</sup> <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=72052&p1=30&ref=12441>

- Avec des catalyseurs courant comme le fer et le cobalt :  $\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \text{ ----> } 2\text{H}_2 + \text{CO}$   
(équation 4)

Réaction facile à mettre en œuvre car l'électrolyse de l'eau nous permet de disposer d'oxygène pur. On peut ensuite mettre en œuvre l'équation 1 du procédé Fischer-Tropsch classique.

### ***Intégration des constituants***

Afin de fixer les ordres de grandeurs on se propose de construire un démonstrateur capable d'utiliser une puissance moyenne de 25 MW.

Il faut d'abord calculer la répartition de l'énergie disponible pour produire de l'hydrogène et du carbone. On voit que pour démarrer la production du carburant de synthèse il nous faut deux fois plus d'atome d'hydrogène que de carbone.

Or il faut 100 kWh électrique par tonne de  $\text{CO}_2$  c'est-à-dire pour 273 kg de carbone. Il faudra les combiner avec 45,5 kg d'hydrogène et en produire en plus 91 kg pour éliminer l'oxygène du  $\text{CO}_2$  le tout consommera 6675 kWh avec un procédé classique d'électrolyse et 6000 kWh avec le procédé que l'on préconise.

On a donc 318,5 kg de combustible (soit 2 barils) pour 6775 kWh.

Le coût énergétique de la production dépend beaucoup du contrat que l'on est capable de négocier avec le producteur. Comme on veut utiliser de l'électricité effaçable, on peut supposer que son coût sera de l'ordre du coût correspondant au tarif le moins élevé disponible c'est-à-dire le prix concédé aux concurrents soit 0,042 €/kWh. Avec ce prix le coût énergétique de nos deux barils est de 252 € soit 126 € le baril. On est dans les ordres de grandeur des prix du pétrole, car celui que l'on obtient par synthèse n'a pas besoin de raffinage, et il est très pur du point de vue des polluants.

On peut penser que le prix du pétrole augmentera encore et qu'on finira par mettre une taxe sur le carbone fossile et donc que la rentabilité de ce type de projet s'en trouvera améliorée. Il y a également une grande sensibilité du résultat par rapport à la performance de l'électrolyse et c'est donc un point qu'il faut sécuriser avant de se lancer dans des investissements importants.

Il faudrait 70 EPR pour produire l'équivalent de la consommation Française de combustibles liquides. Cela y compris l'utilisation de ces combustibles dans les installations fixes. Pour ces installations il serait plus avantageux de remplacer ces combustibles par une autre énergie, plutôt que de produire des carburants synthétiques pour cet usage.

Une idée analogue est développée dans un compte rendu de l'Office Parlementaire D'évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques où il est écrit que recycler le  $\text{CO}_2$  fait partie de la palette des solutions.

### **Reformulation**

Les mesures N° 2, 8 et 9 peuvent être groupées et reformulées ainsi :

Il faudrait produire des combustibles liquides à partir du charbon, des "oil shale", du gaz, de l'énergie nucléaire de la biomasse et de toutes les formes d'énergie non fossile en favorisant celle des énergies qui rejettent le moins de gaz carbonique.

**Objection 5 : *L'exploitation des pétroles non conventionnels n'est pas écologique*****Réponse**

Ce qui n'est pas écologique dans l'exploitation des pétroles non conventionnels, ce sont les procédés utilisés pour les transformer en des matériaux utilisables facilement. Les procédés ont besoin de beaucoup d'énergie pour faire les transformations et utilisent celle qui est disponible dans le pétrole non conventionnel lui-même. Comme ce sont des pétroles lourds avec une grande proportion de carbone cela rejette beaucoup de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Mais rien n'interdirait d'utiliser de l'énergie nucléaire pour faire les transformations ce qui limiterait les rejets. Le Canada par exemple envisage cette solution.

**Reformulation**

La mesure N° 7 peut être reformulée ainsi :

Il faudrait mettre en exploitation les pétroles non conventionnels (Pétroles lourds, sables bitumeux...) en limitant les rejets de CO<sub>2</sub> que cela occasionne.

**Objection 6 : *La taxe carbone va augmenter la pression fiscale.*****Réponse**

Regroupée avec l'objection N°2.

**Objection 7 : *Les centrales nucléaires sont sensibles à la sécheresse.*****Réponse**

Les centrales nucléaires ne sont pas plus sensibles à la sécheresse que les centrales thermiques. En 2003 les 13 dérogations qu'EDF a demandées pour pouvoir rejeter de l'eau à une température plus élevée, concernaient 7 centrales nucléaires et 6 centrales thermiques. Cette sensibilité vient de la machine thermique qui a besoin d'une source froide, et non pas de la partie nucléaire de l'installation. De plus il n'y a pas de problèmes de sécurité car le seul risque que l'on encourt c'est de devoir arrêter la centrale (comme pour les centrales thermiques). Les besoins de refroidissement passent alors de plus d'un Gigawatt à moins de 50 Mégawatts soit 20 fois moins. Si on vient de prendre la décision d'arrêter la centrale c'est qu'il y a encore assez d'eau pour refroidir 20 fois moins pendant quelques heures (le refroidissement peut durer plus longtemps mais les besoins d'eau décroissent rapidement).

### ***Les propositions reformulées***

Nous avons construit un tableau dans lequel on a numéroté 1, 2, 3 ... les propositions initiales et a, b, c ... les propositions reformulées correspondantes.

<p>1. On devrait étudier le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée chaque fois qu'on décide d'une mesure afin de minimiser le coût global pour un même niveau de rejet</p>	<p>a. On devrait étudier le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée chaque fois qu'on décide d'une mesure afin de minimiser le coût global pour un même niveau de rejet</p>
<p>2. Il faudrait produire du pétrole de synthèse.</p>	<p>b. Il faudrait produire des combustibles liquides à partir du charbon, des "oil shale", du gaz, de l'énergie nucléaire de la biomasse et de toutes les formes d'énergie non fossile en favorisant celle des énergies qui rejettent le moins de gaz carbonique.</p>
<p>3. Il faudrait mettre au point un véhicule à faible consommation (de l'ordre de 1.5 l au 100) léger (de l'ordre de 500 kg), d'une puissance limitée (de l'ordre de 30cv) et de performance modeste (110 km/h max).</p>	<p>c. Il faudrait mettre au point un véhicule à faible consommation (de l'ordre de 1.5 l au 100) léger (de l'ordre de 500 kg), d'une puissance limitée (de l'ordre de 30cv) et de performance modeste (110 km/h max).</p>
<p>4. Il faudrait inciter à l'utilisation du véhicule économe par des mesures coercitives (par exemple triplement du prix des carburants) et des primes (du genre prime à la casse par échange gratuit entre un ancien véhicule et un véhicule économe neuf).</p>	<p>d. Il faudrait inciter à l'utilisation du véhicule économe par des mesures coercitives (par exemple triplement du prix des carburants) et des primes (du genre prime à la casse par échange gratuit entre un ancien véhicule et un véhicule économe neuf).</p>
<p>5. Il faudrait mettre au point les procédés qui autorisent, chaque fois que cela est possible, la substitution du pétrole par une autre énergie, avec pour objectif de le remplacer à terme par de l'électricité.</p>	<p>e. Dans la mesure où l'on saurait gérer ou détruire les déchets que la mesure entraîne, il faudrait mettre au point les procédés qui autorisent, chaque fois que cela est possible, la substitution du pétrole par une autre énergie, avec pour objectif de le remplacer à terme par de l'électricité.</p>
<p>6. Il faudrait améliorer le pourcentage de pétrole récupérable sur les sites déjà connus.</p>	<p>f. Il faudrait améliorer le pourcentage de pétrole récupérable sur les sites déjà connus.</p>

7. Il faudrait mettre en exploitation les pétroles non conventionnels (Pétroles lourd, sables bitumeux...).	g. Il faudrait mettre en exploitation les pétroles non conventionnels (Pétroles lourd, sables bitumeux...) en limitant les rejets de CO <sub>2</sub> que cela occasionne.
8. Il faudrait développer des procédés pour transformer du gaz en liquide.	
9. Il faudrait produire des combustibles liquides à partir du charbon, des "oil shale", de la biomasse et de toutes les formes d'énergie non fossile.	
10. Il faudrait taxer le carbone.	h. Il faudrait repenser la TVA et mettre en œuvre une fiscalité qui pénalise l'utilisation du carbone, qui améliore les rentrées fiscales et qui ne pénalise pas les plus pauvres. Cette fiscalité pourrait venir en déduction de la part salariale des prestations sociales, s'appliquer prioritairement aux produits de luxe et épargner les produits de première nécessité.
11. Il faudrait économiser l'énergie dans les bâtiments.	i. Il faudrait économiser l'énergie dans les bâtiments.
12. Il faudrait améliorer l'indice énergétique du PIB et favoriser les transports en commun.	j. Il faudrait améliorer l'indice énergétique du PIB et favoriser les transports en commun.
13. Il faudrait augmenter la production d'électricité renouvelable.	k. Il faudrait augmenter la production d'électricité renouvelable.
14. Il faudrait augmenter la production d'électricité nucléaire.	l. Dans la mesure où c'est économiquement justifié, il faudrait augmenter la production d'électricité nucléaire. Le coût de cette électricité doit prendre en compte les améliorations de la sûreté de fonctionnement, le coût du démantèlement, le coût de la gestion des déchets ce qui majore le prix actuel d'un minimum de 15%.
15. Il faudrait améliorer les réseaux électriques afin qu'ils acceptent	m. Il faudrait améliorer les réseaux électriques afin qu'ils acceptent

l'intermittence plus facilement.	l'intermittence plus facilement.
16. Il faudrait favoriser des installations qui consomment de l'électricité effaçable.	n. Il faudrait favoriser des installations qui consomment de l'électricité effaçable.
17. L'électricité intermittente ne devrait pas être rachetée plus chère que l'électricité garantie pour ne pas mettre les contraintes de l'intermittence à la charge de quelqu'un d'autre.	o. L'électricité intermittente ne devrait pas être rachetée plus chère que l'électricité garantie pour ne pas mettre les contraintes de l'intermittence à la charge de quelqu'un d'autre.
18. Il faudrait rendre les centrales nucléaires existantes plus sûres afin de pouvoir continuer à les utiliser.	p. Il faudrait rendre les centrales nucléaires existantes plus sûres et les rendre capables d'éliminer les déchets nucléaires, afin de pouvoir continuer à les utiliser.
19. Il faudrait accélérer la mise au point de filières nucléaire intrinsèquement sûre et surgénératrice afin d'élargir les réserves d'énergie disponibles.	q. Il faudrait accélérer la mise au point de filières nucléaire intrinsèquement sûre et surgénératrice afin d'élargir les réserves d'énergie disponibles.
20. Il faudrait remplacer le gaz et le fioul de chauffage des bâtiments par de l'isolation, des pompes à chaleur, et de la biomasse en minimisant le prix de la tonne de CO <sub>2</sub> évitée.	r. Il faudrait remplacer le gaz et le fioul de chauffage des bâtiments par de l'isolation, des pompes à chaleur, et de la biomasse en minimisant le prix de la tonne de CO <sub>2</sub> évitée.
21. Il faudrait électrifier l'industrie productrice de matériaux de base : ciment, acier, chimie, métallurgie des non ferreux, papier-carton. Pour cela il faut fournir de l'électricité à un prix compétitif et augmenter l'efficacité énergétique des processus industriels.	s. Il faudrait électrifier l'industrie productrice de matériaux de base : ciment, acier, chimie, métallurgie des non ferreux, papier-carton. Pour cela il faut fournir de l'électricité à un prix compétitif et augmenter l'efficacité
22. Il faudrait conserver une industrie manufacturière locale.	t. Il faudrait conserver une industrie manufacturière locale.

**Tableau 8 Propositions reformulées**

## ***Le plan d'action***

Pour établir un plan d'action, il faut décider de l'ordre de priorité des différentes mesures afin d'étaler dans le temps la mobilisation des ressources, tout en optimisant le plus possible les effets qu'elles induisent.

On a déjà des critères que l'on a jugés pertinents :

- On devrait étudier le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> évitée chaque fois qu'on décide d'une mesure afin de minimiser le coût global pour un même niveau de rejet,
- Il faudrait favoriser les actions qui améliorent la balance du commerce extérieur, le taux de chômage et l'état des comptes publics.

Ces deux critères permettent de décider quelles actions mettre en œuvre lorsqu'on hésite devant plusieurs possibilités contradictoires, mais pour décider de la priorité on propose le critère suivant :

- On dira qu'une mesure x est prioritaire par rapport à une mesure y et on notera  $x > y$  le fait que la mesure y est plus facile à mettre en œuvre si l'on a déjà réalisé x.

Les mesures reformulées satisfont déjà aux deux premiers critères et on va les classer à l'aide du troisième pour avoir notre plan d'action.

On a les relations suivantes : a n'est pas comparable aux autres mesures,  $c = d$ ,  $g = b$ ,  $c > h$ ,  $e > j$ ,  $k > b$ ,  $l > b$ ,  $m > k$ ,  $n > k$ ,  $n > l$ ,  $m = n$ ,  $p > e$ ,  $p > l$ ,  $q > e$ ,  $q > l$ ,  $q > p$ ,  $r = i$ ,  $s = e$ ,  $h > t > j$ .

La mesure f est isolée mais on peut dire qu'il a la même priorité que g et on posera donc  $f = g$ .

La mesure i est isolée mais le principe directeur sous jacent est le même que d et on posera  $i = d$ .

La mesure o est isolée mais le principe directeur sous jacent est le même que m et on posera  $o = m$ .

Finalement on a :  $c=d=i=r > h > m=n=o > k > q > p > l > e=s=t > b=g=f > j$

Les premières mesures concernent les économies d'énergie.

i. Il faudrait économiser l'énergie dans les bâtiments.
r. Il faudrait remplacer le gaz et le fioul de chauffage des bâtiments par de l'isolation, des pompes à chaleur, et de la biomasse en minimisant le prix de la tonne de CO <sub>2</sub> évitée.
c. Il faudrait mettre au point un véhicule à faible consommation (de l'ordre de 1.5 l au 100) léger (de l'ordre de 500 kg), d'une puissance limitée (de l'ordre de 30cv) et de performance modeste (110 km/h max).
d. Il faudrait inciter à l'utilisation du véhicule économe par des mesures coercitives (par exemple triplement du prix des carburants) et des primes (du genre prime à la casse par échange gratuit entre un ancien véhicule et un véhicule économe neuf).

Puis ce sont des mesures fiscales qui viennent en complément.

h. Il faudrait repenser la TVA et mettre en œuvre une fiscalité qui pénalise l'utilisation du carbone, qui améliore les rentrées fiscales et qui ne pénalise pas les plus pauvres. Cette fiscalité pourrait venir en déduction de la part salariale des prestations sociales, s'appliquer prioritairement aux produits de luxe et épargner les produits de première nécessité.

Ensuite il faut adresser le problème de l'intermittence des productions électrique.

m. Il faudrait améliorer les réseaux électriques afin qu'ils acceptent l'intermittence plus facilement.

n. Il faudrait favoriser des installations qui consomment de l'électricité effaçable.

o. L'électricité intermittente ne devrait pas être rachetée plus chère que l'électricité garantie pour ne pas mettre les contraintes de l'intermittence à la charge de quelqu'un d'autre.

On peut alors augmenter la production d'électricité renouvelable.

k. Il faudrait augmenter la production d'électricité renouvelable.

Il faut ensuite améliorer les filières nucléaires.

p. Il faudrait rendre les centrales nucléaires existantes plus sûres et les rendre capables d'éliminer les déchets nucléaires, afin de pouvoir continuer à les utiliser.

q. Il faudrait accélérer la mise au point de filières nucléaire intrinsèquement sûre et surgénératrice afin d'élargir les réserves d'énergie disponibles.

Ce qui permet aussi d'augmenter la production d'électricité nucléaire.

l. Dans la mesure où c'est économiquement justifié, il faudrait augmenter la production d'électricité nucléaire. Le coût de cette électricité doit prendre en compte les améliorations de la sûreté de fonctionnement, le coût du démantèlement, le coût de la gestion des déchets ce qui majore le prix actuel d'un minimum de 15%.

Et de substituer de l'électricité au pétrole ce qui entrave les délocalisations (l'électricité n'est pas abondante partout et devient de plus en plus rentable quand le prix du pétrole augmente).

e. Dans la mesure où l'on saurait gérer ou détruire les déchets que la mesure entraîne, il

faudrait mettre au point les procédés qui autorisent, chaque fois que cela est possible, la substitution du pétrole par une autre énergie, avec pour objectif de le remplacer à terme par de l'électricité.

s. Il faudrait électrifier l'industrie productrice de matériaux de base : ciment, acier, chimie, métallurgie des non ferreux, papier-carton. Pour cela il faut fournir de l'électricité à un prix compétitif et augmenter l'efficacité

t. Il faudrait conserver une industrie manufacturière locale.

L'électricité abondante permet aussi la production d'hydrocarbure de synthèse afin de préserver la mobilité

b. Il faudrait produire des combustibles liquides à partir du charbon, des "oïl shale", du gaz, de l'énergie nucléaire de la biomasse et de toutes les formes d'énergie non fossile en favorisant celle des énergies qui rejettent le moins de gaz carbonique.

g. Il faudrait mettre en exploitation les pétroles non conventionnels (Pétroles lourd, sables bitumeux...) en limitant les rejets de CO2 que cela occasionne.

f. Il faudrait améliorer le pourcentage de pétrole récupérable sur les sites déjà connus.

L'électricité étant une énergie noble qui permet de bons rendements, elle est un facteur d'amélioration de l'indice énergétique du PIB, ce qu'il faut encourager.

j. Il faudrait améliorer l'indice énergétique du PIB et favoriser les transports en commun.

## **Annexes**

### **Remplacer le parc de véhicules particuliers**

On se propose de soutenir la réalisation d'un véhicule économe par une prime à la casse importante et par l'annonce d'un plan drastique d'augmentation du prix des carburants.

Le but est d'arriver à produire un véhicule coûtant moins de 10000 euros, d'une masse de moins de 500 kg, d'une puissance de moins de 30 cv, ayant une vitesse maximale limitée à 110 km/h et ne consommant que 1,5 l/100. Le test de consommation serait fait sur une distance de 500 km comportant 15% de parcours urbains à réaliser en une fois sans ravitaillement. Ces conditions ont pour but d'éviter que les performances du test ne soient pas reproductibles dans un usage courant du véhicule.

On part de la situation simplifiée suivante :

Il y a en France un parc de 38 millions de véhicules particuliers qui effectuent un parcours de 15000 kilomètres par an en consommant 6 litres de carburants aux 100 kilomètres. Le prix d'un

litre de brut est estimé à 0,628931 € et donc les taxes sur les carburants rapportent 29,7 milliards d'euros par an.

Une prime à la casse d'un montant maximum de 10000 euros est offerte par l'état pour toute personne remplaçant un véhicule ancien par un véhicule consommant moins de 1,5 l/100. Cette prime est limitée au prix de la voiture de remplacement. Le modèle coûtant moins de 10000 euros permet donc un remplacement gratuit des véhicules anciens, mais les constructeurs peuvent proposer des modèles plus luxueux.

Le plan se déroule sur 11 ans et permet de remplacer 1 millions de véhicules la première année, 2 millions la deuxième, 3 la troisième et 4 les suivantes jusqu'à un total de 38 millions. Le cumul des écarts de taxes monte jusqu'à 383 Milliards d'euros ce qui permet de financer les 380 milliards d'euros de dépenses relatives à la prime à la casse.

Années	Coût kilométrique ancien	coût kilométrique essence	Prix du litre	Montant des taxes	Ecart entre les nouvelles taxes et les anciennes	Cumul des écarts de taxes	Cumul Taxes/coûts des primes à la casse
1	0,121735849	0,030433962	2,03	46935000000	17251981132	17251981132	7251981132
2	0,145735849	0,036433962	2,43	57915000000	28231981132	45483962264	15483962264
3	0,169735849	0,042433962	2,83	66330000000	36646981132	82130943396	22130943396
4	0,193735849	0,048433962	3,23	71370000000	41686981132	123817924528	23817924528
5	0,217735849	0,054433962	3,63	74250000000	44566981132	168384905660	28384905660
6	0,241735849	0,060433962	4,03	74970000000	45286981132	213671886792	33671886792
7	0,265735849	0,066433962	4,43	73530000000	43846981132	257518867925	37518867925
8	0,289735849	0,072433962	4,83	69930000000	40246981132	297765849057	37765849057
9	0,313735849	0,078433962	5,23	64170000000	34486981132	332252830189	32252830189
10	0,313735849	0,078433962	5,23	51750000000	22066981132	354319811321	14319811321
11	0,313735849	0,078433962	5,23	39330000000	9646981132	363966792453	-16033207547
12	0,313735849	0,078433962	5,23	39330000000	9646981132	373613773585	-6386226415
13	0,313735849	0,078433962	5,23	39330000000	9646981132	383260754717	3260754717

Le prix de l'essence augmente jusqu'à 5,23 € comme indiqué dans le tableau. Le coût final au kilomètre de l'essence pour le véhicule économe est de 0,08 € et se compare favorablement au coût de 0,09 € relatif à un véhicule consommant 6l/100 et avec le niveau de taxes actuel.

L'augmentation des taxes permet de financer la prime à la casse, génère une trésorerie positive de 37 milliards au bout de 7 ans et nécessite une avance de 16 milliards au bout de 11 ans. Après 13 ans le bénéfice en taxes est de 3 milliards et il augmente ensuite de 9,6 milliards tous les ans.

La baisse des importations de pétrole entraîne sur 13 ans une amélioration de la balance commerciale de 102 milliards d'euros qui se prolonge chaque année par une amélioration de 16 milliards d'euros soit 23% du déficit commercial de 2011. Après la période de transition, le déficit du budget est réduit chaque année de 9,6 milliards soit 0,5% du PIB environ.

On profite d'un bénéfice supplémentaire relatif aux rejets de CO<sub>2</sub> de la France : ceux-ci sont diminués de 60 millions de tonnes ce qui fait baisser les rejets par Français et par an de 6,75t à 5,83t. Autre avantage : les importations de véhicules classiques devraient baisser.

Le plan n'a que des avantages, si ce n'est qu'il faut se déplacer dans un véhicule ayant des performances réduites mais suffisantes pour accomplir sa mission.





