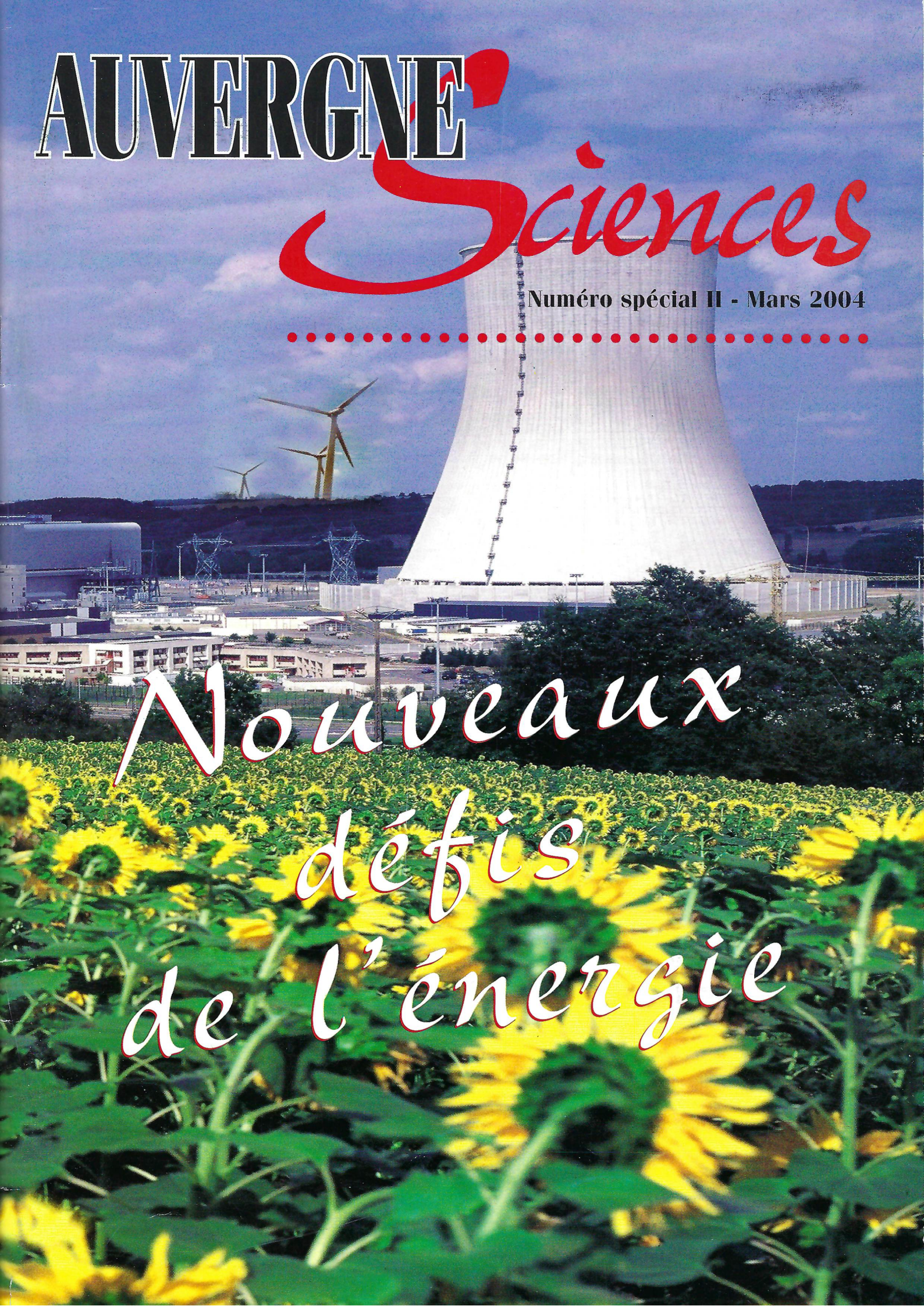
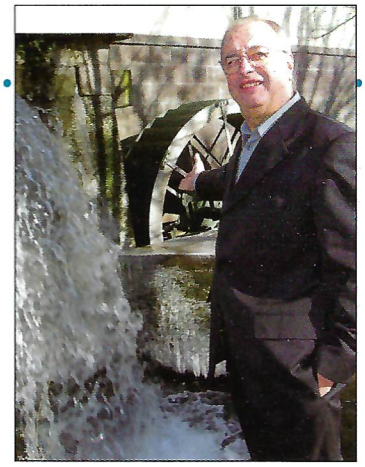
AUVERGNE Sciences

Numéro spécial II - Mars 2004



Nouveaux défis de l'énergie

éditorial



Ce numéro spécial est consacré aux NOUVEAUX DEFIS DE L'ENERGIE.

Mais qu'est-ce que l'énergie ? De quoi parle-t-on quand on utilise le terme énergie ? Une première définition liée à l'origine grecque du mot : « Energia » peut se traduire par « force en action », tandis que ce mot dérive lui-même « d'ergon » que le français traduit par « travail ». En réalité cette définition n'épuise pas la nature du « concept » mis en jeu.

« Dire que l'énergie peut être cinétique ou potentielle ne définit pas ce qu'est vraiment l'énergie » (Richard P. Feynman), et pourtant la moindre petite action qu'elle soit physique, mentale…manuelle ou par l'intermédiaire d'une machine, met en œuvre de l'énergie. Pour un physicien, il n'y a pas de forme de vie, de processus vivant, sans une série complexe, extrêmement complexe, de « transactions énergétiques » dans lesquelles l'énergie passe d'une forme à l'autre, ou se trouve transférée d'un élément biologique (cellule, neurone…muscle…) à l'autre.

L'énergie n'est pas une substance que nous pouvons « prendre en main ». Elle peut se voiler aussi bien dans la lumière du Soleil , d'une lampe (Energie rayonnante), que dans un cyclone se propageant dans l'atmosphère (Energie cinétique ou de mouvement), dans du charbon ou de l'essence (Energie chimique), dans une batterie d'accumulateurs (Energie électrique), dans un noyau atomique (Energie nucléaire).

Ce numéro spécial d'une cinquantaine de pages s'adresse à tous les lecteurs désireux d'enrichir leur documentation et en particulier aux enseignants des diverses disciplines ; l'auteur des ***NOUVEAUX DEFIS DE L'ENERGIE*** *explorera une douzaine de pistes de réflexions sur les énergies pour demain sachant que l'estimation de l'accroissement de la demande mondiale en énergie est de l'ordre de 50 % d'ici 2040. Début 2004 un projet de loi d'orientation sur les énergies sera proposé au Conseil des Ministres puis soumis au vote du Parlement. « Notre politique énergétique doit concilier deux impératifs » a indiqué Nicole Fontaine – Ministre délégué à l'Industrie - D'une part l'approvisionnement et l'indépendance énergétique du pays, d'autre part le respect de l'environnement.*

A noter que dans le récent « Débat national sur les énergies » les physiciens ont regretté, à juste titre, le manque de perspective scientifique. Un devoir impérieux d'urgence croissante interpelle les scientifiques : « Le devoir de présence ».

L'ADASTA est aujourd'hui fière de publier ce travail sur les ***NOUVEAUX DEFIS DE L'ENERGIE****. qui fait l'objet d'une deuxième revue spéciale Auvergne Sciences.*

Son auteur, Monsieur Louis AVAN :

- *Professeur à la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand de 1957 à 1973*
- *Cofondateur du Laboratoire de Physique Nucléaire*
- *Professeur au C.N.A.M. – Conservatoire National des Arts et Métiers - de 1972 à 1993*
- *Membre de l'ADASTA*
- *Membre de la Société Française d'Energie Nucléaire (S.F.E.N.)*
- *Membre de la Société Française de Physique (S.F.P.)*
- *Président de l'Institut Théologique d'Auvergne (I.T.A.)*
- *Président de l'Association Riche-Lieu*

a présenté une remarquable conférence sur ce sujet le 10 décembre 2003 dans les locaux de l'ADASTA situés à l'I.T.A. Cet ouvrage de recherche, de synthèse. d'analyse, d'observations politico-scientifiques est le fruit de dizaines d'années de travail.

L'auteur introduira les premières réflexions au sujet des exigences éthiques de la science, puis seront développés tour à tour :

- Les Fondements : « les principales unités »

- L'énergie, problème universel

- Les premières maîtrises de l'énergie

- Puis ensuite les énergies fossiles, l'énergie nucléaire de fission, l'énergie renouvelable, l'énergie éolienne, le solaire, des piles à combustible à la voiture à hydrogène.

- La fusion thermonucléaire contrôlée. I.T.E.R. (International Thermonuclear Experimental Reactor)

« Grâce aux températures internes du Soleil ou des étoiles, la fusion naturelle se produit »

Dans la revue du 4e trimestre 2005 nous vous tiendrons informés de l'évolution concernant tous ces thèmes.

Les lecteurs pourront poser s'ils le souhaitent des questions par courrier électronique adressé à :

adasta@wanadoo.fr

une réponse leur sera donnée mensuellement.

Nous remercions vivement tous ceux qui ont participé à cette publication, Hélène Berthelier et Annie Ville pour le secrétariat, Bernard Ragout Webmaster dans l'Association, Jocelyne Allée rédactrice en chef.

Enfin, nos sponsors, sans qui nous n'aurions pu entreprendre cette revue spéciale, sont ici particulièrement remerciés.

Bonne lecture à tous
Le Président
Jean-Claude CAPELANI

Merci à nos sponsors

AUVERGNE
CONSEIL RÉGIONAL D'AUVERGNE

CONSEIL GENERAL
DU PUY-DE-DOME

VILLE DE
CLERMONT
FERRAND

ministere
jeunesse
education
recherche

ministere delegue
recherche et nouvelles
technologies

EDF
Electricité
de France

MICHELIN

Dossier Spécial

Nouveaux défis de l'énergie

Ce document de l'ADASTA explore une douzaine de pistes de réflexion :



Ce travail constitue un "essai". L'initiative en revient à l'ADASTA, à son Président Jean-Claude Capelani. Son élaboration a été réalisée par un secrétariat de grand talent et de parfaite disponibilité.

Nous remercions également EDF, GDF, Trelleborg-Industrie, IDEX et la Manufacture Française de Pneumatiques Michelin pour de précieuses informations.

De nombreux clichés ont été fournis gracieusement par des auteurs cités au cours du texte, de même que les références bibliographiques.

A tous, merci de tout cœur

Louis AVAN

Piste 1	Au sujet des exigences éthiques de la Science, de la Technologie, de la Politique	*P. 3*
Piste 2	Les Fondements : "Les Principes" - "Les Unités"	*P. 4*
Piste 3	L'Energie, problème universel	*P. 7*
Piste 4	Petite Histoire des premières maîtrises de l'Energie : une leçon pour aujourd'hui	*P. 8*
Piste 5	"Les Energies fossiles ont-elles un avenir ?" Les Défis de l'Environnement. Répliques	*P. 10*
Piste 6	L'Energie nucléaire de fission, hier, aujourd'hui et demain. Ses défis : Le problème majeur des déchets	*P. 17*
Piste 7	La Biomasse	*P. 24*
Piste 8	L'Energie éolienne	*P. 26*
Piste 9	Le Solaire Thermique. Le Solaire Photovoltaïque	*P. 29*
Piste 10	Des Piles à Combustible à la voiture à Hydrogène ?	*P. 32*
Piste 11	La fusion Thermonucléaire contrôlée	*P. 35*
Piste 12	(Piste ouverte...) Esquisse brève pour un bouquet énergétique respectueux des quatre conditions : Sobriété énergétique Efficacité énergétique : la Cogénération - la Thermoélectricité Respect de l'environnement Contribution à la solidarité internationale	*P. 41*

Piste 1

Au sujet des exigences éthiques de la science, de la technologie, de la politique

1 - "Il n'y a point de vent favorable pour celui qui ne sait où il va"

(Sénèque, Cordoue v. 60 av. J.C. Rome v. 39 apr. J.C.)

2 - Un devoir inconditionnel de recherche de la vérité s'impose au scientifique. Recherche, mais non possession... Dans les domaines qui touchent aux besoins fondamentaux de la Communauté humaine, cette non-possession lui impose la pratique d'un langage clair qui puisse informer le "Débat Citoyen" et contribuer à des décisions politiques justes. Cette contribution représente un DEFI : **"Le devoir de clarté est une exigence éthique"**.

3 - La Science ne donnera jamais l'explication de tout, l'idéologie non plus. Les physiciens ont regretté, à juste titre, le manque de perspective scientifique dans le récent "Débat national sur les énergies". **Un devoir impérieux, d'urgence croissante, interpelle les scientifiques : "Le devoir de présence".**

4 - Les retombées de la Science et de la Technologie commandent un nécessaire examen de leur potentiel, de leurs contraintes, de leurs limites. Cette exigence vaut pour toute forme d'énergie : ... de l'énergie nucléaire de fission aux énergies dites renouvelables.

L'idéologie ne peut éliminer la rigueur des chiffres. Qu'il s'agisse des contraintes sévères liées aux déchets nucléaires : Plus d'un million de m³ de résidus de tout type, pour 40 ans de fonctionnement des centrales nucléaires françaises couvrant aujourd'hui 1237 années de fonctionnement.

Mais aussi l'emprise au sol des fermes éoliennes susceptibles de prendre la place d'une seule centrale nucléaire de 1000 mégawatts électriques : compte tenu des 35% de disponibilité des éoliennes pour les 80% de celle des centrales, il faudrait 1 500 éoliennes de 1,5 mégawatt, couvrant 30 000 hectares (17 km x 17 km).

...Même répartie en "fermes élémentaires", ou en éoliennes "offshore", l'emprise représente des contraintes lourdes. Les nouveaux projets (Royaume Uni, Total) explorent ces contraintes et les améliorations techniques nécessaires.

...Autant de défis de nature différente, que tout programme énergétique doit prendre en compte. Il n'est pas de forme d'énergie sans avantages, sans inconvénients, voire sans risques difficiles à maîtriser.

5 - L'exploitation des sources d'énergies, illimitées ou non, quelles que soient les performances technologiques qui les rendent possibles, ne saurait se dispenser d'une **approche éthique**. Elle porte plusieurs noms : la maîtrise de la demande

d'énergie (sobriété énergétique) ; l'optimisation des filières classiques en même temps que le développement raisonné des énergies renouvelables, le tout en vue d'une efficacité énergétique qui respecte l'environnement, tout en exigeant un accroissement de l'effort de recherches sur les nouvelles sources d'énergie.

Toutes ces exigences d'une politique de l'énergie ne peuvent être l'objet d'une simple proclamation médiatique, sans la "délibération réfléchie" qui conduise à un "jugement de prudence" orienté vers le bien de la Communauté. *[Référence : Aristote "Ethique à Nicomaque"]*

Cette communauté ne se limite pas aux "Pays du Nord" qui représentent 25% de la population mondiale mais consomment 75% de l'énergie mondiale disponible : un Américain utilise en moyenne vingt fois plus d'énergie qu'un habitant de l'Asie du Sud. Deux milliards d'êtres humains ne disposent au mieux que du bois de chauffage, à l'exclusion de toute autre énergie : nous sommes en présence d'un redoutable

.....Défi d'Equité .....

Dans cette perspective mondiale, la Science a élargi le champ d'une éthique politique. Les scientifiques sont en présence d'un double **défi d'information et de solidarité** : Mettre à la disposition des publics – Jeunes compris – des connaissances de base objectives, fiables et intellectuellement accessibles.

6 - Défi de Responsabilité exprimé par Hans Jonas, élève de Husserl et Heidegger, dans "Principe Responsabilité" (Paris Cerf. 1990) appliqué au "futur lointain", porteurs de "nouveaux pouvoirs", donc de fragilité, elle-même issue du pouvoir : "Le fragile est confié à notre garde, remis à nos soins". Le lecteur aura compris que le fragile n'est autre que la Terre et l'Humanité entière.

7 - Défi de Prévision : ce défi vise la prise en compte des échelles de temps réelles et des engagements financiers qui rendent possibles et réalistes le passage des Etapes de Recherche, de Développement, à celle des Prototypes, puis du Développement Industriel. Ces étapes nécessitent le plus souvent des collaborations internationales.

8 - En présence des défis, et des problèmes extraordinairement complexes posés par les Energies du Futur, le Scientifique, l'Enseignant garderont en mémoire l'anecdote de Michel-Ange traversant à vive allure la place Saint-Pierre de Rome alors qu'il venait d'achever des Fresques de la Chapelle Sixtine... un ami l'interpelle *"Michel-Ange, où vas-tu comme cela en courant ? - A l'école pour apprendre"*... tandis que Paul Valéry aimait à commenter, et à commencer ses cours au Collège de France en proclamant *"Je viens ignorer devant vous"*.

Plus modestement, le Service de la Science, de l'enseignement, commande : Rigueur, Humilité... nouveaux Défis pour les pistes qui suivent ; elles ne sauraient prétendre à l'exhaustivité. Nous refusons toute position dogmatique.

Remarque : Une analyse économique approfondie des filières énergétiques n'était pas de notre compétence. Nous nous sommes limités à quelques indices significatifs.

Piste 2
Les fondements : "les Principes" "les Unités"

Pour comprendre la nature de la grandeur physique "Energie" - essentielle et "mystérieuse" - on ne peut que suivre les variations de forme, "d'habillement", qui la rendent perceptible.

• Les transactions énergétiques – introductions de chaleur Q ou de travail W à partir d'une énergie interne U – s'appuient sur des Lois de conservation et d'évolution "clés de voûte" qu'on appelle **"Principes de la Thermodynamique".**

• Ces transactions mettent en œuvre des unités de mesure : de la calorie au joule, puis au watt (joule par seconde)... puis au kilowattheure ; aujourd'hui du terawattheure à la "tonne équivalent pétrole".

• On aura toujours $\Delta U = Q + W$ (Premier principe).

L'Energie, tout comme l'Eau, la Nourriture, l'Air que nous respirons, est une ressource indispensable à toute vie humaine.



Fig.1 - Sadi Carnot
La Puissance motrice du feu
(Portrait Bailly. 1813)

Jusqu'au XIX[ème] Siècle, la possession des matières premières commandait le développement économique, technologique des régions du monde. Les seules énergies mises en œuvre dans ce développement étaient celles que nous appelons aujourd'hui "Renouvelables" *(Voir § VII)*. Depuis l'avènement de l'époque industrielle, le développement d'un Pays dépend de sa "Maîtrise de l'Energie". S'y ajoute aujourd'hui, avec une importance croissante, la Maîtrise de l'Information, elle-même consommatrice d'énergie, de sorte que la présence du problème énergétique demeure prégnante à tous les niveaux : un simple regard sur les processus naturels d'une part : astronomie, météorologie..., et dans le domaine économique d'autre part, extrême dépendance énergétique de l'Europe, largement importatrice de pétrole.

Mais qu'est-ce que l'énergie, tout juste évoquée par les lignes précédentes ?

De quoi parle-t-on quand on utilise le terme "énergie" ?

Une première définition liée à l'origine grecque du mot : "Energeia" peut se traduire par "force en action", tandis que ce mot dérive lui-même "d'ergon", que le français traduit par "travail". En réalité cette définition n'épuise pas la nature du "concept" mis en jeu.

"Dire que l'énergie peut être cinétique ou potentielle ne définit pas ce qu'est vraiment l'énergie" (Richard P. Feynman).

Et pourtant la moindre petite action, qu'elle soit physique, mentale... manuelle ou par l'intermédiaire d'une machine, met en œuvre de l'énergie.

Pour un physicien, il n'y a pas de forme de vie, de processus vivants, sans une série complexe, extrêmement complexe, de "transactions énergétiques" dans lesquelles l'énergie passe d'une forme à l'autre, ou se trouve transférée d'un élément biologique (cellule, neurone... muscle...) à l'autre.

L'énergie n'est pas une substance que nous pouvons "prendre en main". Elle peut **se voiler** aussi bien dans la lumière du Soleil ou celle d'une lampe (Energie rayonnante), dans un cyclone se propageant dans l'atmosphère (Energie cinétique ou de mouvement), dans du charbon ou de l'essence (Energie chimique), dans une batterie d'accumulateurs (Energie électrique), dans un noyau atomique (Energie nucléaire).

En outre elle change continuellement de "forme" : en allumant une lampe électrique, on convertit l'énergie électrique en chaleur et en lumière. En frottant une allumette, l'énergie mécanique et chimique devient chaleur et lumière.

Lorsque nous consommons du lait ou des légumes, par toute une série de processus métaboliques, nous transformons l'énergie chimique des aliments en chaleur (calories) et en énergie musculaire mécanique au niveau de notre organisme : notre cœur bat, nous respirons ; dans notre corps, l'information est transmise le long de fibres nerveuses appelées "axones" sous forme d'impulsions électriques ! (Mais l'énergie musculaire elle-même prend sa source dans les interactions électriques au niveau des atomes et molécules de notre corps...). Les processus biologiques sont, au niveau élémentaire, "consommateurs, transformateurs d'énergie".

"Les Principes de la Thermodynamique : clés de voûte"

Si l'énergie, sous ses diverses formes, peut être transférée d'un système à l'autre et changer de "mode", elle n'est jamais ni créée à partir de rien, ni détruite.

C'est le principe de conservation de l'énergie ou premier principe de la Thermodynamique, base de toutes les Sciences de la Nature et de l'exploitation des diverses formes d'énergie.

"Dans un système fermé, coupé de toute interaction, de tout échange avec le reste de l'Univers, il existe une grandeur, que nous appelons Energie, et dont la somme des diverses formes demeure constante".

Sous sa forme mathématique, le premier principe est exprimé en terme de balance énergétique : à savoir la variation de la fonction énergie interne notée E ou U [L'énergie interne d'un système est égale à la somme des énergies microscopiques des particules du système, mesurées dans le repère barycentrique]

$$\Delta E \text{ (ou } \Delta U) = Q + W :$$

Chaleur Q et travail W sont deux manifestations différentes d'une même grandeur fondamentale : l'énergie.
(Le signe + indique "chaleur ou travail reçus")

Généralisation : Pour être en mesure d'appliquer cette relation aux composants d'une "Centrale" (thermique, nucléaire...), à savoir turbines, compresseurs, pompes, nous devons examiner de plus près les termes de cette relation : En premier lieu il nous faut préciser les limites du système : ces "frontières" bornent un "volume de contrôle". Elles peuvent coïncider avec une surface réelle, matérialisée par une paroi solide. L'introduction d'une telle frontière permet de considérer les propriétés locales et de suivre l'évolution d'un fluide qui s'écoule dans une machine.

Conservation de la masse :
En l'absence de réactions nucléaires, la masse est une propriété conservative.

Notation : $\dot{m} \equiv \frac{dm}{dt}$ représente le débit massique de fluide en kilogramme par seconde.

Principe de conservation : $\frac{dmcv}{dt} = \Sigma_i \dot{m}_i - \Sigma_e \dot{m}_e$

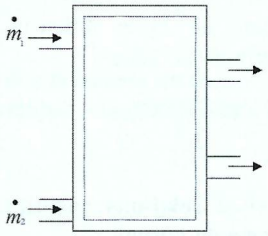


Figure 2 - Schéma Hélène Berthelier-ADASTA)

i : entrée ; e : sortie ; cv : volume de contrôle
Dans le cas stationnaire : dmcv/dt = 0

$$\Sigma_i \dot{m}_i = \Sigma_e \dot{m}_e$$

Les travaux : Nous devons spécifier le travail requis pour assurer les mouvements d'entrée et de sortie du fluide dans le volume de contrôle : en partant de dW = PdV

on obtient $\dot{W} = P \frac{dV}{dt} = \dot{m}\,(vP)$; v désignant le volume massique.

u + Pv désigne **l'enthalpie massique h**. Sans ambiguïté nous pouvons supprimer sur Q et W les indices cv et nf ; le premier principe devient :

$$(dE_{cv} / dt) = \dot{Q} + \dot{W} + \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)_i - \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)_e$$

Dans le cas stationnaire : $dE_{cv} / dt = 0$

$$\dot{m}_i = \dot{m}_e \equiv \dot{m} \text{ (entrée et sortie uniques)}$$

$\dot{Q} \equiv \dot{m}q$ et $\dot{W} \equiv \dot{m}w$

Il vient : $\boxed{q + w = (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g\,(z_2 - z_1)}$

Enfin, dans beaucoup de situations, on peut négliger les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle du fluide de travail.

Le premier principe s'exprime alors par l'équation $\boxed{\Delta h = q + w}$

Δh étant la variation d'enthalpie massique entre l'entrée d'un dispositif (pompe, chaudière, turbine ..) et sa sortie

Cas général : entrées et (ou) sorties multiples

$$(d\,E_{cv} / dt) = \dot{Q} + \dot{W} + \Sigma \dot{m}_i \left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right) - \Sigma \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + gz\right)$$

in **out**

Cas stationnaire d'une entrée (1) et de 2 sorties (2+3)

Si $\dot{Q} = \dot{W} = 0$ (et si les variations d'énergies cinétiques et potentielles sont négligeables)

$\boxed{\dot{m}_1 h_1 = \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3}$ (Balance énergétique)

Ces deux relations sont valables pour toutes les transformations réversibles et irréversibles.

"Deuxième principe de la thermodynamique"

Ce principe fut d'abord énoncé par Sadi Carnot (1796-1832) en 1824, dans "La puissance motrice du feu".

Remarquant qu'une partie importante de la chaleur fournie par la chaudière d'une machine à vapeur n'était pas transformée en travail mais était perdue, Carnot eut l'intuition d'un nouveau principe (intuition d'autant plus remarquable que le premier principe n'était pas encore découvert).

1 - Une machine thermique ne peut produire de travail au cours d'un cycle à partir d'une seule source : à l'image de la machine à vapeur, elle doit comporter une source chaude (chaudière) et une source froide (condenseur).

2 - La source chaude fournit nécessairement à la source froide une chaleur qui n'est pas transformée en travail. Ce que nous traduisons par le schéma suivant :

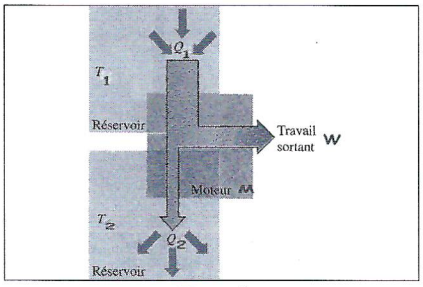


Figure 3
(Schéma Hélène Berthelier-ADASTA)

Lord Kelvin, Clausius et Planck ont précisé l'énoncé du second principe par Sadi Carnot : Nous retiendrons les conséquences suivantes tout-à-fait cruciales.

• L'introduction d'une température thermodynamique T par Lord Kelvin en 1848 est telle que sur un cycle réversible :

$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$, **c'est l'égalité de Clausius**

Q_2 , chaleur perdue par M est donc négative.

• La conservation, dans un cycle réversible du rapport $\frac{|Q_i|}{T_i}$ conduit Clausius à introduire en 1860 le concept d'entropie S telle que $dS = \frac{\delta Q}{T}$ dans une transformation réversible dans laquelle T désigne la température du thermostat.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \left[\frac{\delta Q}{T}\right]_{rev}$$

Sur un processus irréversible $\Delta S \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$

Si $\delta Q \equiv 0, \Delta S \geq 0$ l'entropie d'un système isolé ne peut pas décroître.

En physique statistique, l'entropie est définie par S = k Ln ($\Delta\Gamma$) où k : cte. de Boltzmann : k=1,38.10^{-23} J.K^{-1} et $\Delta\Gamma$: volume accessible dans "l'espace de phase".

On montre que cette définition, **générale**, concorde avec celle déduite de **l'égalité de Clausius.**

Principe de Nernst-Planck

L'entropie d'un système est nulle au zéro absolu.

C'est le Troisième Principe de la Thermodynamique

• Echelle de température Kelvin : devenue légale depuis 1954, l'unité de température est déterminée par une convention internationale selon laquelle la température ϑ_0 température du point triple de l'eau, vaut ϑ_0 = 273,16 K

Si une transformation réversible s'effectue entre le point triple de l'eau et un autre thermostat de température inconnue T, cette dernière est définie par :

$$T = 273{,}16 \frac{Q}{Q_0}$$

Q_0 : chaleur transférée à partir du point triple.
Q : chaleur émise par le corps d'épreuve.

La température de fusion de l'eau vaut 273,15 K soit un écart de 0,01 K par rapport au point triple

L'échelle Celsius est alors définie par t = (T-273,15)° C

Pour l'eau	
t_{fusion} = 0°C $t_{vaporisation}$ = 100°C	Sous P = 1,01325 bar

Rendement d'une machine thermique ditherme

Par définition $\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1}$

Pour une transformation réversible, l'égalité de Clausius donne :

$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

(Quel que soit le fluide de travail et le cycle ditherme)

Pour un cycle ditherme irréversible (processus "naturel")

$\eta < 1 - \frac{T_2}{T_1}$

Ces 2 relations constituent le théorème de Carnot.
Pour maximiser le rendement d'une machine thermique, il faut rendre le rapport T1 / T2 aussi grand que possible.

Nouvel énoncé du Second Principe.
Le second principe définit le sens privilégié dans lequel les transformations peuvent se dérouler et précise les conditions d'équilibre de l'état thermodynamique du système.
Il peut encore s'exprimer ainsi :
L'entropie d'un système adiabatique $\delta Q \equiv 0$ et fermé ne peut qu'augmenter ou rester constante.

Pour aller plus loin, nous devons aborder la question des unités de mesure d'énergie (ou de puissance). Les débats récents ont mis en évidence, dans ce domaine, des risques de confusion, ou d'incompréhension.

"Les Unités"

• *La calorie* permet d'élever la température d'un gramme d'eau de un degré, au voisinage de 20°C.

• *Le joule* fut d'abord défini comme :

Unité de travail : un physicien définit le travail (W) comme le produit de la force (F) qui produit ce travail, par la distance (d) sur laquelle elle s'exerce W = F.d : un litre d'eau, de masse 1 kilogramme, est soumis au voisinage de la Terre, à une force gravitationnelle qui est son Poids, soit F = P = mg = 9,81 newtons ~10 newtons.

Si nous soulevons une bouteille d'un litre d'eau de un mètre, nous effectuons un travail (musculaire) de 10 joules.

Unité de puissance : si nous soulevons cette bouteille rapidement, nous effectuons le même travail sur une période plus brève.

Si l'énergie traduit l'aptitude à effectuer du travail, la puissance correspond à la vitesse de variation temporelle de ce même travail P = dW/dt. La puissance s'exprime en watts, ou joules par seconde.

L'expérience fondatrice réalisée par William Prescot Joule établit l'équivalence mécanique de la calorie de telle sorte que :

1 calorie = 4,185 joules

Le Système International d'Unités a choisi le joule (J.) comme unité légale commune à toutes les formes d'énergie.

Unités dérivées :

• Le kilowatt-heure, unité typiquement électrique est **l'énergie** (fournie ou consommée) par une source (ou un récepteur) fonctionnant **pendant une heure**

1 kWh = 3,6. 10^6 J.

• Un mégawatt-heure =
1 MWh = 3,6. 10^9 J.

• Un gigawatt représente une puissance P = 10^9 watts

• Un terawatt-heure = 1 TWh = 3,6.10^{18} J. En l'an 2000, environ 430 réacteurs nucléaires ont produit 2 400 TWh d'électricité.

Les indices e et th accolés aux unités de puissance signifient respectivement "électrique" et "thermique"
Ex. : 1 Mwe ≡ 1 mégawatt électrique

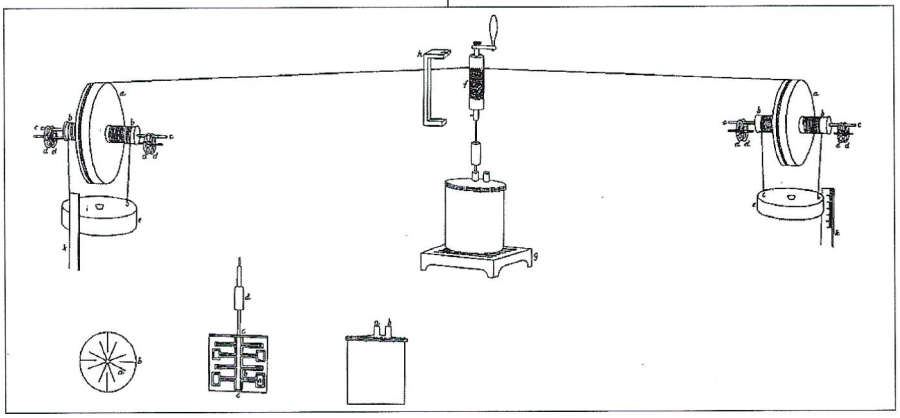


Figure 4
Réf. Dispositif de Joule in "Philosophical Transactions". 1850

• La confrontation des diverses sources d'énergie donne lieu à l'introduction d'unités pratiques.

• *1 kilogramme d'explosif TNT* = 4,18 TJ

• *1 tonne équivalent pétrole (tep)* représente 10 034 M calories ≈ GJ. ≈ 11,7 MWh

• *1 tonne équivalent charbon (tec)* représente 7 000 M calories ≈ 29 GJ

La pratique industrielle et économique a privilégié les multiples du kilowatt-heure et la tonne équivalent pétrole.

Par convention internationale
1TWh = 0,086 M tep

Le domaine des fissions et de la fusion nucléaire conduit à la définition d'une unité d'énergie spécifique.

• L'électron-volt est l'énergie cinétique d'un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt

1 eV = $1,60.\ 10^{-19}$ joule
1 MeV = $1,60.\ 10^{-13}$ joule
1 TeV = $1,60.\ 10^{-7}$ joule
1 joule = $0,625.\ 10^{7}$ TeV

Piste 3
L'énergie : problème universel

• Il n'est pas d'action, de transformation, qui ne mette en cause une transaction énergétique.

• De la fission d'un noyau atomique d'Uranium 235 au fonctionnement d'un réacteur nucléaire.

• De la décharge d'un neurone à une commande musculaire.

• D'une transition atomique à une émission lumineuse $\Delta E = h\nu$

• De l'énergie thermonucléaire du cœur du Soleil à la genèse de la biosphère, puis "à la structure fine" de cette dernière : Marée, cyclone, photosynthèse, vie quotidienne.

• Du soleil à la Voie Lactée "elle-même dévoreuse de galaxie"

• Einstein et la Loi $E = mc^2$: Gloire et Tragédies

Exemples : Le Soleil est à l'origine de toute l'énergie mise en œuvre sur la Terre. Son énergie est d'origine thermonucléaire (Fusion des noyaux d'hydrogène en hélium dans un "cœur porté à 15 millions de degrés"). La photosphère rayonne, chaque seconde, $3,86.10^{26}$ joules (Energie lumineuse). Ce qui correspond, au niveau de la Terre, (donc avant absorption par l'atmosphère plus dense), à 1 365 watts par m^2.
Puissance moyenne reçue **au sol** :
1 kW/m² sous un soleil zénithal.

• **En un an l'énergie éolienne**, due à l'action combinée de la rotation de la Terre et des variations de température est de l'ordre de 10^{22} joules alors que dans la même période l'humanité utilise 3.10^{20} joules (3%).

• Dans les Caraïbes, un cyclone transporte jusqu'à 4.10^{18} joules.

• En 1883, l'explosion du volcan du Krakatoa (Indonésie) a dégagé 10^{19} joules, soit l'équivalent de cent mille bombes atomiques d'Hiroshima.

• Une bombe à fusion de 15 mégatonnes libère 10^{17} joules.

• La décharge d'un neurone représente 10^{-10} joules.

• La fission d'un noyau d'uranium libère 200 MeV **soit $3,2.10^{-11}$J.**

Application des principes de la Thermodynamique – Cogénération

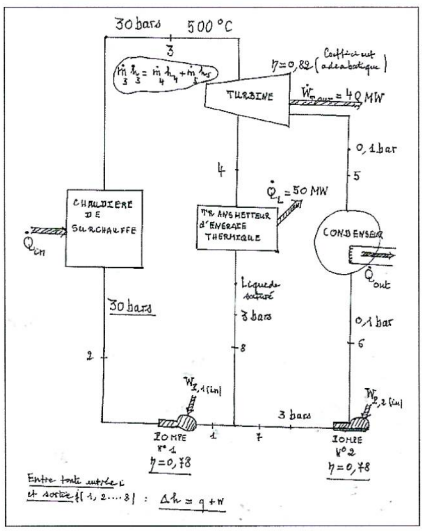


Figure 5
Schéma Louis Avan

Les coefficients adiabatiques indiqués au niveau de la turbine et des pompes prennent en compte les irréversibilités liées aux frottements internes des fluides de travail. Il en résulte des chutes de pression. Le terme "adiabatique" signifie que, globalement, turbine et pompes sont thermiquement isolées.

L'examen des valeurs d'enthalpie données dans les tables numériques et l'application des deux premiers principes de la thermodynamique conduisent à un rendement global η = 0,542 au lieu de 0,24 pour la seule turbine. D'où l'intérêt de la cogénération en production d'énergie déconcentrée. Deux réserves cependant : assurer la qualité de l'électricité déversée sur le réseau E.D.F. (pour la France) et veiller aux contraintes dues aux effets de pointe.

Voir Piste 5 : un exemple de trigénération (Trelleborg-Industrie Clermont-Ferrand)

Extensions : énergie et qualité de vie (I)

L'examen des unités d'énergie nous conduit aussi à examiner un problème concret du quotidien, hors situation industrielle, mais loin d'être indépendant de cette situation.
Un adulte a besoin, quotidiennement, pour vivre normalement, d'environ 10^7 joules (soit 2 390 kilocalories, unité traditionnellement utilisée en nutrition, 1 kcalorie = 4,18 kJ). La figure 6 représente un cycle journalier.

Une seule pulsation du cœur exige de l'ordre de 0,5 joule. Un repas normal nous apporte une chaleur de l'ordre de 5.10^6 joules. Pendant une nuit de huit heures, un organisme adulte effectue "un travail" de l'ordre de $2,0.10^6$ joules, presque autant qu'une heure d'exercice physique.

Extensions : énergie et qualité de vie (II)

Un indice important de qualité de vie dans un Pays est la consommation alimentaire exprimée par la F.A.O. en kilocalories par jour. Les données suivantes correspondent à l'année 1998.

France : 3 588 kilocalories par personne et par jour, ce qui correspond à 1,44 fois la recommandation de la F.A.O. qui distingue également la nourriture d'origine végétale (V) et animale (A) : soit pour la France V : 62% ; A : 38%

Burkina Faso : 2 155 (V : 96% - A : 4%) (91% F.A.O.)

Cameroun : 2 214 (V : 94% - A : 6%)

Ethiopie : 1 614 (V : 93% - A : 7%) (69% F.A.O.)

Pour être plus précise, la consommation doit être pondérée par le taux de protéines. L'examen des données de l'Organisation Mondiale de la Santé fait ressortir une corrélation forte entre Consommation Energétique, Taux de mortalité infantile, Espérance de vie, Indices de ressources par habitant (Produit Intérieur Brut Aménagé), Taux de scolarisation : autant d'indices qui contribuent à évaluer un autre indicateur, celui de la qualité de vie.

A la consommation alimentaire vitale, il faut ajouter la "puissance énergétique nécessaire" pour une vie humaine "convenable" (propreté, chaleur, transports en commun, produits manufacturés, radiateurs...) : on peut prendre comme référence un radiateur de 1 kilowatt fonctionnant en permanence. Sur une année, cela fait $3,15.10^{10}$ J, soit **0,75 tep**

Hubert Reeves ("Mal de Terre" Ed. Quillet, mars 2003) compare ce kilowatt-an à la consommation européenne moyenne :

5 kW-an (3,75 tep) et à la consommation américaine : 12 kW-an (9 tep).

....Ces données posent dès maintenant le problème de la demande énergétique et des économies nécessaires.

Louis Leprince-Ringuet estimait que les découvertes de l'électricité, de la thermodynamique et de leurs retombées pratiques : machine à laver, aspirateur, frigidaire... ont fait plus pour la "libération de la femme" que les écrits de Simone de Beauvoir ou Françoise Sagan.

Tout aussi sérieusement, les progrès de la chaîne du froid et des conditions de transport, ont contribué à améliorer la santé et à doubler l'espérance de vie des populations de pays en voie de développement.

Ces deux remarques ne dispensent pas d'une réflexion sur les besoins en énergie et sur la demande croissante en "énergie propre", invariant de toutes les politiques de santé et des exigences de respect de l'environnement.

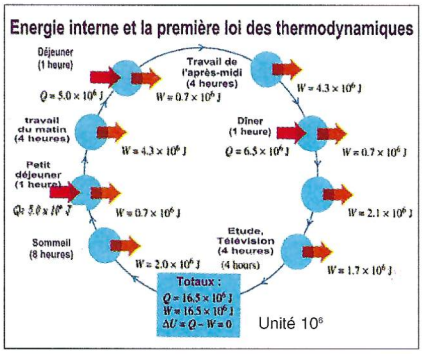


Figure 6
Le signe – devant W indique qu'il s'agit d'un travail ***produit*** *et non* ***reçu***
(Réf. : D'après University Physics - Young. Freedman - 9e Ed. Addison - Wesley Comp. Inc. 1996 p. 541)

Piste 4

Petite histoire des premières maîtrises de l'énergie : une leçon pour aujourd'hui

• Après l'énergie motrice humaine (les ilotes, les leviers d'Archimède), l'énergie animale (les chevaux)... les énergies hydraulique, éolienne... constituent les premiers exemples "d'énergies renouvelables". Exemples : les voiliers, les moulins à eau, à vent.

• **Les premières percées technologiques, véritables "ruptures", leçon pour l'avenir** : Les cames, la géométrie des aubes, la révolution des turbines.

• La règle d'or h = q+w va transformer la découverte des turbines en date historique majeure dans l'histoire de la production d'énergie.

Energies renouvelables

Il y a deux cents ans, les Hommes n'utilisaient que les "Energies renouvelables" :

Bois pour le chauffage

Traction mécanique (Transports, Travaux) exploitant la force musculaire des animaux, des hommes : qu'on pense à l'origine des conquêtes romaines ou au Réservoir de Bicêtre fournissant l'eau au "Tout Paris" de l'époque, le manège qui actionnait la pompe était mû par "deux chevaux, douze hommes ou vingt quatre épileptiques".

• L'Energie hydraulique : un exemple d'énergie renouvelable

Histoire. Principe "Les Moulins à eau"

Les moulins à eau sont connus en Syrie, il y a 2 500 ans. Mais la première référence historique précise est due au géographe grec STRABO, suivant lequel le roi MITHRIDATE VI EUPATOR dit "Le Grand", roi du Pont, utilisait une machine hydraulique, sans doute pour moudre le grain, et ceci en 65 avant Jésus-Christ...
Cette machine en bois tournait sous l'action du courant des rivières ou des chutes d'eau, véritables "moulins à eau" utilisant l'énergie mécanique naturelle hydraulique. A Hama, 80 norias en bois de peuplier sont encore en activité.

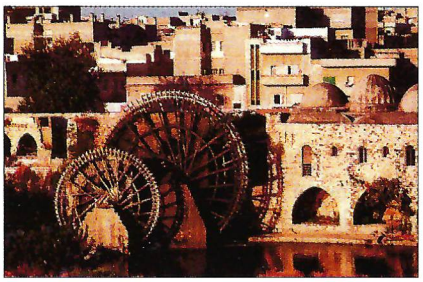


Figure 7 - Norias sur l'Oronte à Hama (Syrie) (cliché U. Vidali)

L'énergie hydraulique est directement liée au cycle solaire :

- 22% de la chaleur apportée par les "rayons solaires" sert à l'évaporation de l'eau de la surface des mers et des océans (soit près des trois quarts de la surface terrestre). La vapeur d'eau ainsi produite monte dans l'atmosphère et forme des nuages transportés par le vent.

- Il existe des parties importantes de la surface terrestre où la pluie tombe peu ou très rarement : ce sont les déserts mais la majorité des terres émergées est bien arrosée (ce qui favorise le développement de l'agriculture).

- Les pluies qui tombent sur les régions montagneuses (ou les neiges fondues, ce qui revient au même) tendent à descendre sous l'action de la force de gravitation sous forme de chutes d'eau ou de cascades. D'autres tombent dans des cuvettes naturelles et forment les lacs de montagne.

Toutes ces eaux descendant tôt ou tard des hauteurs finissent dans les rivières, les fleuves, et retournent ainsi à la mer. Le cycle de l'eau, résultant du cycle solaire via les fleuves et les rivières, recommence ainsi indéfiniment.
En définitive l'énergie hydraulique transforme l'énergie gravitationnelle en énergie motrice par le fait de ses changements de niveau.

- Les premiers "arbres" des moulins à eaux étaient verticaux. Ils étaient solidaires de roues à aubes en rotation dans un plan horizontal.

- Un autre dispositif devenu classique comporte un arbre horizontal et une roue à aube verticale. Ce moulin à eau est décrit par l'architecte et ingénieur romain VITRUVE (De Architectura X,5,2). L'eau arrive au-dessous du centre de la roue, est guidée vers l'extérieur par un canal avant de tomber, actionnant ainsi le mouvement de la roue. Un système d'engrenage disposé à angle droit transmet le mouvement au moulin.

Ce type de moulin à eau devint très populaire dans l'empire romain, notamment en Gaule, lorsque l'avènement du christianisme favorisa la libération des esclaves. Certaines roues de diamètre 1,80 mètre fournissaient une puissance de 3 chevaux-vapeur (1cv = 736 Watts). Les norias de Hama ont des diamètres de 10 à 12 mètres.

L'approvisionnement idéal est celui que fournit un fleuve à débit rapide et constant au cours de l'année : Ces moulins sont fréquents au nord des Alpes, mais plus rares en Grèce, en Italie et en Asie Mineure.

Procope (Guerre des Goths, I 19, 19sq) décrit un moulin flottant de ce genre, construit sur le Tibre par Bélisaire pendant le siège de Rome en 537.

- L'exploitation systématique de la puissance de l'eau telle qu'on la trouve par exemple dans la série de seize roues découverte à Barbegal près d'Arles, dut attendre le milieu du IIIème Siècle. Vers la fin du IVème Siècle, l'usage des ressources en eau pour alimenter les moulins commence à faire l'objet de dispositions légales... et de litiges.

- Au XIème Siècle les cames transforment les mouvements circulaires en mouvements de translation.

- En 1759, l'ingénieur anglais John Smeaton réalise un appareil destiné à mesurer l'influence de la vitesse de l'eau. Il fut ainsi le premier à déterminer le rendement des roues à eau. Smeaton réalise des roues, puis des engrenages en fonte, mettant fin au règne des tout bois en vigueur depuis l'empire romain.

- Au début du XIX^{ème} Siècle, l'ingénieur français Jean-Victor Poncelet, mathématicien, réalise des aubes courbes permettant à l'eau de rentrer sans choc, de s'écouler vers la surface des aubes courbes, d'arriver pratiquement au repos au niveau du diamètre inférieur et de tomber ainsi sans vitesse. Les 22% de Smeaton (attaque de la partie basse) deviennent 65%. D'autres perfectionnements sont apportés par l'ingénieur écossais Fairbairn.

Mais au cours du XIX^{ème} les roues à eau sont progressivement supplantées par les turbines dont les vitesses de rotation peuvent être régulées, et dont le mouvement rapide permet d'alimenter des générateurs hydroélectriques.

Quelques moulins à eau survivent aujourd'hui. Dans les années 1970, plus de mille moulins à grains étaient dénombrés au Portugal.

Moulin Richard de Bas à Ambert

A Ambert le moulin Richard de Bas fonctionne depuis le Moyen Age. Le papier (25 kg par jour) est fabriqué à partir de chiffons réduits en bouillie par une batterie de pilons actionnés par l'arbre à cames du moulin à eau : on y disperse ensuite pétales et fougères avant de plonger la forme dans un tamis doté d'un des 2 000 filigranes, de laisser s'écouler l'eau et de déposer les feuilles sur un feutre.
La Constitution de la V^{ème} République est imprimée sur du papier "d'Ambert".

• L'Energie hydroélectrique

Les turbines sont les successeurs modernes des moulins à eau. Une turbine convertit l'énergie stockée dans un fluide en énergie mécanique. Résumons le principe des turbines quel que soit le mode : la conversion est généralement réalisée en faisant passer le fluide, gaz ou liquide à travers un système de vannes fixes qui alternent avec des pales en ailettes fixées à l'arbre en rotation (ou rotor). Le flux est aménagé de telle sorte qu'une force tangentielle est exercée sur les pales du rotor. Le couple résultant provoque alors la rotation de l'arbre et le travail peut être extrait.
Les turbines à eau qui nous concernent actuellement exploitent l'énergie potentielle résultant de la différence de niveau entre par exemple le barrage et la sortie de la turbine : la force linéaire due à la chute est transformée en force rotative.
Les turbines peuvent actionner directement des alternateurs en vue de produire de l'énergie électrique.
La première centrale hydroélectrique fut construite à Appleton, aux Etats-Unis, en 1882. En France, pour la première fois en 1883 une turbine hydraulique actionnait une dynamo. C'était à Vizille près de Grenoble. En 1885, Thomas Edison invente l'ampoule électrique.

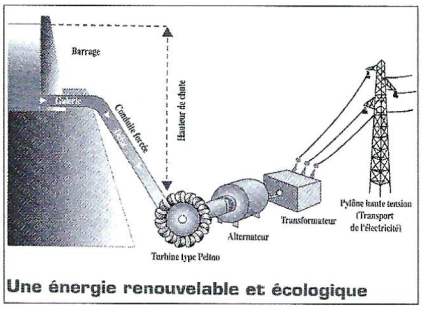


Figure 9 - Centrale de Bort-les-Orgues : hauteur de chute 450 mètres (Source : Centrale de Bort-les-Orgues)

On distingue trois catégories d'usines hydroélectriques :

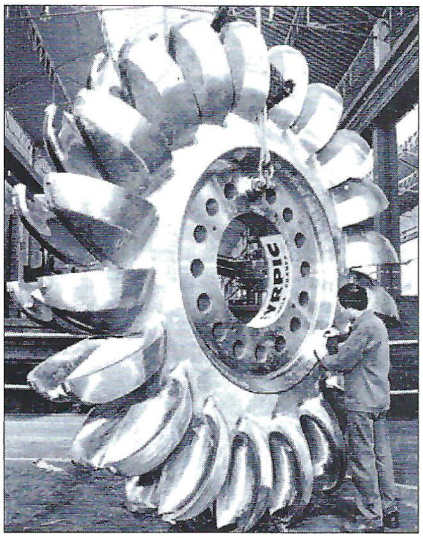


Figure 8
Augets de roue Pelton (E.D.F.)

1 - *Les usines de lacs ou de barrages* où la chute d'eau est supérieure à 300 mètres et même très supérieure (hauteur : 2 000 m). Le principe général est simple. Nous l'illustrons par un barrage d'Auvergne même si sa dénivellation est moins élevée.
Le lac de barrage de Bort les-Orgues, deuxième retenue d'eau en France après celle de Serre-Ponçon, fut le premier des cinq grands ouvrages qui équipent la Dordogne. Pour compléter l'alimentation du barrage, E.D.F. a relié plusieurs retenues en s'efforçant de respecter les paysages grâce à des tunnels. Les eaux du lac du Tact se déversent ainsi dans le lac "La Trégret" (le seul lac naturel d'origine glaciaire de l'ensemble) ; lui-même se déverse dans une antichambre de la retenue de Lastioulles, où arrivent également les eaux du lac de Taurons *(Réf. Pierre Mazataud. Source : "L'Auvergne".)*

A partir de l'usine de dérivation réalisée au niveau du barrage, une ou plusieurs **conduites forcées** vont ensuite transformer l'énergie gravitationnelle due à la dénivellation en énergie mécanique, utilisable par la turbine.

Pour une usine de barrage à haute dénivellation les turbines de **Pelton** (du nom de l'inventeur américain) sont les plus utilisées. Les turbines de Pelton sont des turbines à impulsions ou à action et axe horizontal où l'énergie potentielle est d'abord transformée en énergie cinétique dans l'injecteur qui crée un jet cylindrique à grande vitesse. Ce jet est formé à l'intérieur d'un caisson qui sert de STATOR à la machine. Une aiguille mobile dans le sens de l'axe de l'injecteur règle le débit, pour éviter tout coup de bélier. CETTE PHASE SE REALISE A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE.

Le deuxième élément de la turbine Pelton est la roue munie d'augets périphériques sur lesquels est appliqué l'effet moteur du jet. Chaque auget est symétriquement frappé par le jet d'eau de part et d'autre de l'arête médiane qui sépare ses deux cuvettes. La structure de l'auget lui permet d'offrir une surface sensiblement normale à l'impact de l'eau.

Ainsi s'achève l'extraction de l'énergie potentielle initiale et sa conversion en travail utile par couplage avec l'alternateur. Le rendement travail produit sur énergie cinétique du jet dépasse 91%. On peut augmenter la puissance d'une turbine Pelton en multipliant le nombre de jets : deux pour une machine horizontale, plus pour une machine verticale.

2 - Les usines "éclusées" - les plus courantes - pour des dénivellations comprises entre 25 et 400 mètres sont équipées de turbines à réactions de type **"Francis"** (du nom de l'ingénieur américain d'origine britannique).
Dans une turbine à réactions les forces responsables du mouvement du rotor sont produites par la réaction de la veine d'eau accélérée dans le caisson tandis que la pression tombe : le principe rappelle celui de l'arrosoir rotatif (tourniquet) hydraulique où le jet émergeant actionne le "rotor" dans la direction opposée. Dans ce type de turbine le flux entre de façon radiale par une voie en spirale et ressort suivant l'axe. Le plus grand barrage du monde, le barrage Itaïpu, réalisé sur la rivière Panama entre le Brésil et le Paraguay, comporte 18 turbines Francis développant chacune 740 Mégawatts pour une dénivellation comprise entre 112 et 127 mètres.

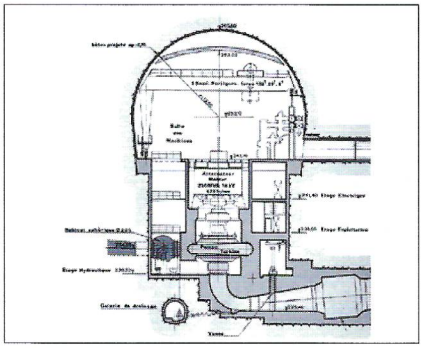


Figure 10 - Turbine Francis incorporée. Montézic (Réf. E.D.F. Unité de Production Centrale 2002).

3 - Les usines au fil de l'eau – pour une dénivellation entre 4 et 20 mètres – sont nombreuses dans la vallée du Rhône, de la Dordogne, de la Vézère. Elles sont équipées de turbines à réaction KAPLAN, machine hélice à flux axial et à aubes mobiles orientables, ou de groupes "bulbes".
C'est le cas de l'usine marémotrice de la Rance : l'amplitude de marée également vaut 13,50 mètres : 24 turbines réversibles fournissent au total 240 MW.
Cette usine marémotrice, la plus grande du monde, est un exemple d'utilisation de la colossale énergie gravitationnelle du Cosmos.
D'une façon générale, la puissance en kilowatts est proportionnelle au produit du débit en m^3 par seconde par la dénivellation en mètres.

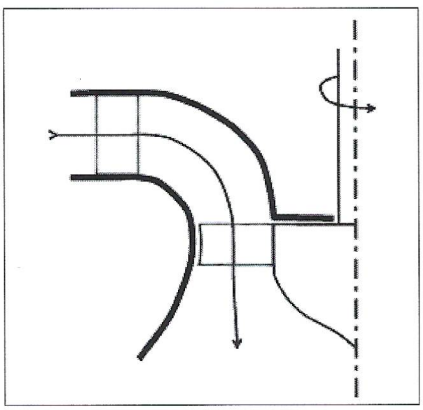


Figure 11 - Turbine hélice à aubes mobiles orientables (Kaplan) (schéma B. Ragout ADASTA)

- En Norvège, la multitude de cascades fournit une énergie hydroélectrique pratiquement gratuite.

- En France plusieurs grandes centrales et environ 2 000 petites centrales de puissance inférieure à 8 000 kW fournissent au total 69 000 mégawatts électriques (pour un total d'énergie électrique consommée de 475 TWh *(voir doc. E.D.F.)*.
Pour les grandes centrales le coût à la production est de 2 centimes d'Euro par kWh ; il monte à 4 centimes pour les petites centrales. (Pour l'usine de la Rance, il varie de 5 à 11 centimes).
Le potentiel hydroélectrique est insuffisamment exploité dans le monde (moins de 20% du potentiel utilisable).

- En Afrique, de petites centrales de 20 kW alimentent en éclairage et réfrigérateurs des villages de 500 personnes.
Le développement potentiel concerne les pays d'Asie, d'Amérique Latine, l'ex URSS.

Avantages : Technique éprouvée. Flux inépuisable donc Energie renouvelable. Fonctionnement économique. Pas d'effet de serre.

Inconvénients : L'investissement peut être important. Nécessité d'appoint pour les centrales au fil de l'eau (irrégularités saisonnières). Problème juridique et pratique des prélèvements, même pour de petites centrales, risques paysagers... disparition de villages.

Conclusion : Les "bâtisseurs de chutes" ont encore 100 ans devant eux !

L'Energie éolienne

Rappelons que par ciel clair une surface de $1m^2$ orientée perpendiculairement aux rayons du soleil reçoit au niveau de sol une puissance moyenne voisine de 1 kilowatt.
"Au départ - à l'origine ! - l'énergie solaire est thermonucléaire en ce sens qu'elle résulte du processus de fusions qui - toutes les secondes - transforme 400 millions de tonnes d'hydrogène en hélium au cœur du soleil".
"L'énergie éolienne", "tirée de la force du vent" est le fruit de l'action du rayonnement solaire sur les masses d'air et les océans : l'énergie cinétique, due à l'action combinée de la rotation de la Terre (Force de Coriolis) et des variations de température, provoque la formation dans l'atmosphère de zones de hautes et de basses pressions qui donnent naissance aux vents. Environ 0,29% de l'énergie solaire qui atteint la basse atmosphère est transformée en énergie éolienne.
Sans l'énergie éolienne la découverte de l'Amérique n'aurait pas eu lieu il y a cinq siècles.

Quelques traits de l'énergie éolienne :

Elle est considérable : si on pouvait en capter seulement le dixième, on couvrirait 20 fois les besoins mondiaux en énergie.

Mais elle est capricieuse : liée aux conditions d'existence, de direction et de vitesse du vent, de régularité.



Figure 12 - Le trois-mâts "Cutty Sark" à Greenwich - (cliché A. Ville)

Elle est immémoriale : depuis des millénaires, l'homme utilise l'énergie éolienne pour faire avancer les bateaux à voiles, du plus petit aux célèbres "Trois-Mâts".

La brise de mer ou de terre bien connue des navigateurs à voile a pour origine la différence de température entre l'air situé au-dessus de la mer et l'air situé à son niveau.

- En 1840, lors de l'arrivée de la machine à vapeur, on comptait en France 55 000 moulins à vent.

- Dès 1630, l'ingénieur hollandais Leeghwater assèche 4 700 hectares avec 50 moulins à vent en bois actionnant des pompes dites éoliennes.

- En 1941, l'ingénieur américain Putman construit la première génératrice éolienne importante, 12 500 kilowatts ; elle fonctionne jusqu'à sa destruction par une tempête en 1945.



Figure 13 - Moulin à vent - Bruges (Cliché F. Jandot)

Piste 5

Les énergies fossiles ont-elles un avenir ?
(Charbon, pétrole, gaz naturel)

Les défis de l'environnement
Répliques

Les combustibles fossiles sont des matériaux d'origine organique comprenant trois grandes catégories :

- **Le pétrole classique** (auquel il faut associer les bruts lourds et le bitume d'une part, les schistes bitumeux d'autre part)
- **Le gaz naturel**
- **Le charbon**

Leur origine ?

Les végétaux ont commencé à se développer depuis des millions d'années à la surface de la Terre sous l'effet de la photosynthèse induite par la lumière solaire. La même énergie solaire est responsable des processus géochimiques et biochimiques qui vont transformer les résidus d'organismes végétaux (et animaux), au rythme des époques géologiques (sur des centaines de millions d'années le plus souvent) en combustibles fossiles.

Pétrole, charbon, gaz naturel contiennent du carbone : sa combustion fournit de l'énergie et engendre du gaz carbonique.

Les longues étapes de la genèse des hydrocarbures (pétrole, gaz) et des anthracites, liquides et sables bitumeux, puis de leur exploitation forment une histoire souvent passionnante et complexe.

Un seul exemple : celle du pétrole commence avec la formation des éléments primitifs végétaux et animaux (diatomées, algues, planctons, foraminifères...) reconnus à l'ère paléozoïque, 540 millions d'années avant la création de la "Standard Oil" par D. Rockfeller en 1870, et donc bien avant que l'avènement de l'automobile ne conditionne au XX^{ème} Siècle la toute puissance des compagnies pétrolières et son retentissement sur l'économie mondiale.

Leur importance dans l'histoire de la maîtrise de l'énergie

La première révolution dans la maîtrise de l'énergie intervient à la fin du XVII^{ème} Siècle. Denis Papin, inventeur français, discerna le premier dès 1679 la force élastique de la vapeur et passa sa vie (en France, en Angleterre, en Allemagne) à perfectionner les "machines" utilisant cette force. Chassé en Angleterre par la "Révocation de l'Edit de Nantes", il réalisa sa "marmite" pour laquelle il imagina une soupape de sûreté. Parti résider à Kassel (Allemagne), il établit le principe de la machine à vapeur "à pistons", en 1687.

Le passage du principe à la réalisation pratique est marqué par les travaux de Thomas Savery : sa "machine à vapeur" utilisait la tension de la vapeur d'eau comme force motrice appliquée au pompage de l'eau dans les mines de charbon ; on l'appelait "l'amie du mineur", mais elle risquait d'exploser en raison des très hautes pressions. Avec Thomas Newcomen il inventa, en 1712, la "machine à feu" employant la pression atmosphérique, mais de très faible rendement.

A partir de 1763, avec les travaux de James Watt (1736-1819), nous abordons

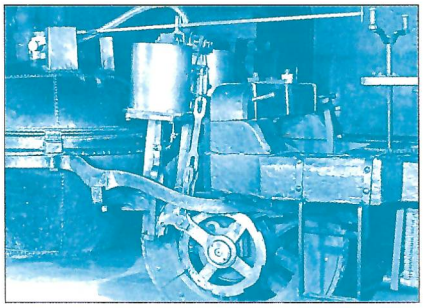


Figure 14 - En 1771 le "fardier de Nicolas-Joseph Cugnot" actionne le premier véhicule automobile à moteur (Réf. Musée national des Techniques CNAM - Paris - photo M. Pasquet)

la première phase de l'ère industrielle. La machine de Newcomen consommait trop de charbon. Watt invente l'enceinte de condensation maintenue froide et séparée du cylindre ; il imagine également de fermer l'extrémité supérieure du cylindre pour éviter les pertes de chaleur dans l'atmosphère. La pression de vapeur contribue à actionner le piston. Watt conçoit un ensemble de liaisons mécaniques qui maintiennent rectiligne le mouvement du piston, tandis que son va-et-vient est connecté à une manivelle qui entraîne une roue. La première machine à vapeur est brevetée par Watt en 1769,... presque aussitôt son "régulateur à boules" rectifie les inégalités de production de vapeur. Enfin "l'arbre" est muni d'un lourd volant qui uniformise le mouvement de la machine.

La machine à vapeur, adoptée dans plusieurs pays, est à l'origine de la Première Révolution Industrielle (terme introduit en 1837 par l'économiste français J. Auguste Blanqui).

Cette "Révolution" transforme les usines (et tout d'abord les usines de tissage, à

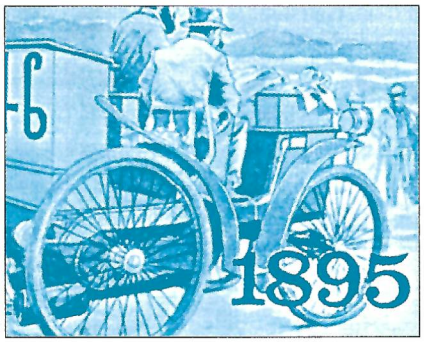


Figure 15 - 1895 "L'Eclair" (Document de la Manufacture Française de Pneumatiques Michelin)

partir de 1790), puis les transports : bateaux à vapeur, locomotives à vapeur et chemins de fer (1840)... éclairage au gaz.

L'intervention des combustibles fossiles va rythmer le bouleversement ainsi inauguré.

En 1800, le bois fournit aux Etats-Unis et en Europe plus de 90% des besoins en combustibles.

En 1885 (le pétrole est découvert), le bois ne fournit plus que 50% des besoins. Sa contribution est réduite à moins de 3% en 1980...

Dès 1870, la balance se déplace progressivement du charbon vers le pétrole et le gaz naturel.

Aujourd'hui (mars 2004), si nous considérons **l'énergie "primaire"** (celle qui n'a pas été transformée en une autre énergie), **plus de soixante-quatre pour cent de l'énergie commercialisée dans le monde provient des hydrocarbures : pétrole et gaz naturel.**

Ces 64% représentent 5,5 milliards de tonnes équivalent pétrole (tep). En 2001, le charbon ne représentait plus que 25% de la consommation d'énergie primaire commerciale. Le nucléaire atteint, au niveau mondial, 7,6% (0,7 Gtep) et l'hydraulique est pratiquement stable à 2,6% d'une consommation commerciale mondiale voisine de 8,6 Gtep.

[Sources : Agence Internationale de l'Energie et Mémento de l'Energie. 2001, CEA].

Pour la France, le graphique suivant représente l'évolution de la consommation des énergies fossiles de 1960 à 2000 :

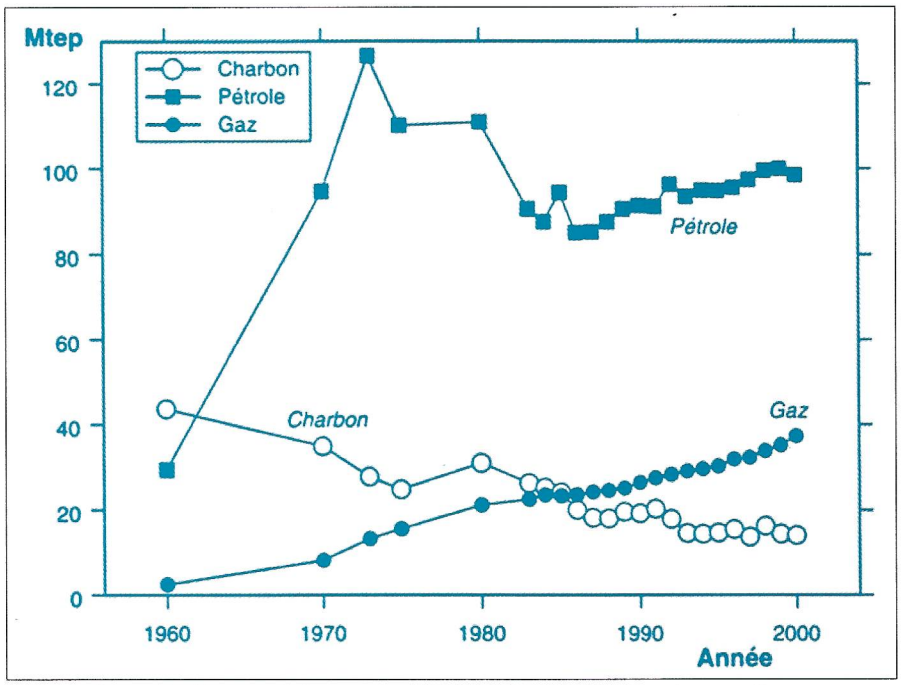


Figure 16 - Evolution de la consommation de charbon, de pétrole et de gaz en France entre 1960 et maintenant. (Source : Mémento de l'énergie - CEA 2001)

La France produit très peu de pétrole brut : 1,4 mégatonne en l'an 2000, soit moins de 1,5% de nos besoins :

Au niveau mondial, les combustibles fossiles soulèvent deux questions essentielles :

• L'état des ressources, "récupérées" ou récupérables en fonction des divers gisements.

• L'influence de leur consommation sur l'environnement.

1 - Les Ressources : Les trois tableaux suivants, d'après *"World Oil" (Août chaque année), "Oil and Gas Journal" (Décembre chaque année) et "Géology in Coal Ressource Utilization" (1991)* publiés dans *"Encyclopedia Britannica 1998. Vol. 19"*, concernent notamment les "Réserves" clairement identifiées d'une part, les "Ressources" estimées et non découvertes d'autre part, respectivement pour le pétrole, le gaz et le charbon.

Les premiers 200 milliards de barils de pétrole ont été produits de 1859 à 1968, soit 109 ans. Depuis cette période la production annuelle s'est stabilisée autour de 22 milliards de barils.

Pour l'an 2000, la production mondiale était de 3,5 gigatonnes soit 25,7 milliards de barils.

La Source "BP Statistical Review of World Energy" de juin 2001 donne une réserve mondiale de 142,1 gigatonnes.

Les réserves sûres évaluées par "Oil and Gas Journal" (1997) conduisent à 152,3 gigatonnes.

Quoi qu'il en soit des fluctuations inévitables (liées en particulier aux ressources estimées et non découvertes, lesquelles donneraient pour l'estimation "Oil and Gas Journal" une réserve totale de 226 gigatonnes), on s'attend à un déclin de la production pétrolière à partir de 2020, sans qu'il y ait risque de pénurie avant 2050 (horizon des décideurs économiques et politiques !).

Un problème très sérieux est celui du prix : le prix du baril est passé à près de 40 dollars par baril après le choc pétrolier de 1979-1980 à quelque 10 dollars en 1986, pour se fixer par la suite entre 15 et 25 dollars par baril... Il est certain qu'après 2020, le pétrole "bon marché" devenant plus rare, l'évolution économique mondiale entraînera une augmentation des prix... Il en résultera une augmentation du "risque géopolitique" induit par la concentration de 60% des réserves de pétrole conventionnel - à moins de 2 dollars de coût de production - dans cinq pays du Moyen-Orient. "A L'horizon 2020, la Chine et les Etats-Unis auront tous les deux recours au pétrole venu du Moyen-Orient, à 70% de la consommation totale" :

- Problème géopolitique et environnemental (qualité de l'air, réchauffement de la planète)

- Problème de sécurité énergétique

(John Boesel, Président de l'organisme non lucratif CALSTART - Californie. Conférencier au Challenge Bibendum 2003- courtoisie Pierre Loiret).

Le Pétrole

Régions	Productions cumulées en milliards de barils	Réserves	+ Ressources estimées et non découvertes	Dotation totale estimée
Amérique du Nord	202	106	121	429
Amérique du Sud	74	93	44	211
Europe de l'Ouest	23	19	28	70
Europe de l'Est incluant Russie	113	104	64	281
Asie Centrale et Transcaucasie	16	24	39	79
Moyen Orient	194	666	122	982
Afrique (y compris Afrique du Nord)	57	62	48	167
Océanie et Asie	45	45	81	171
Total Mondial	**724**	**1119**	**547**	**2390**

La carte suivante, extraite de "L'Atlas Géopolitique et Culturel" du "Petit Robert des noms propres" (janvier 2000) représente les flux pétroliers pour l'année 1998.

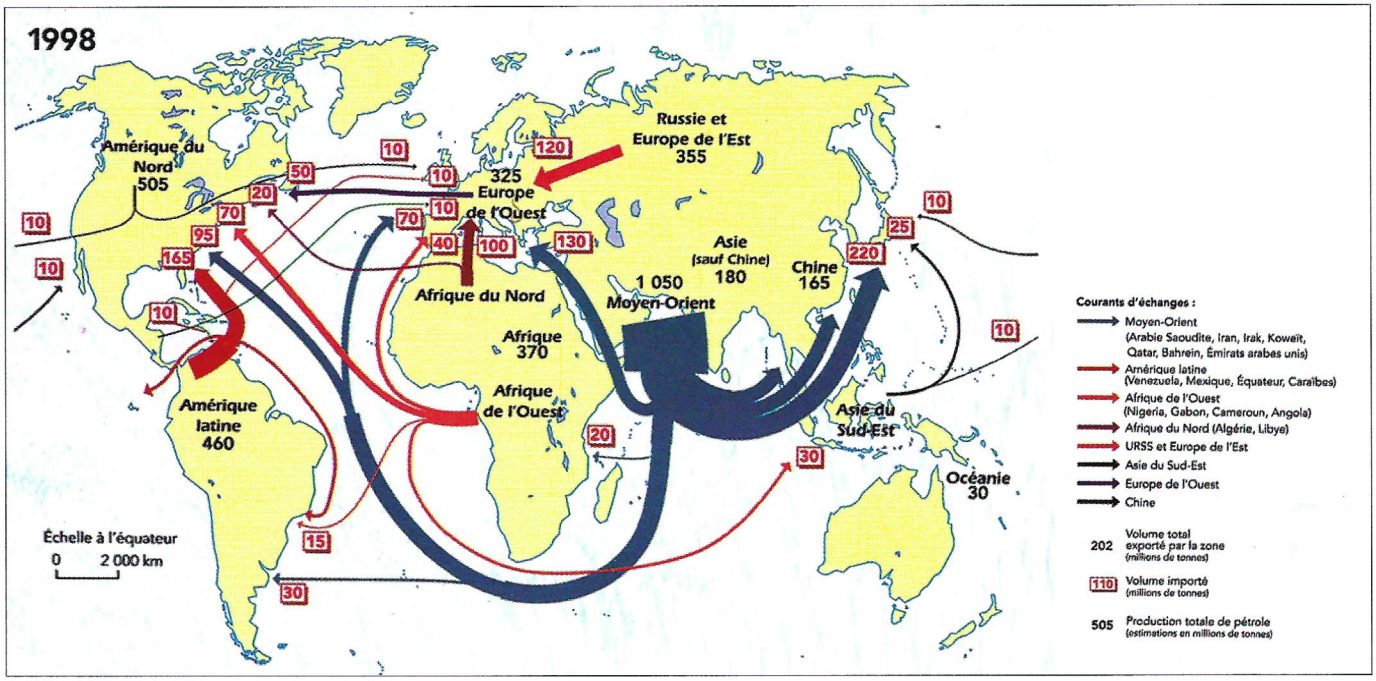


Figure 17

Gaz naturel : unité : 10^{12} m^3 NTP *En moyenne 1 m3 G.N* [a] *11 kWh*		*Réserves statiques* 68 ans *(réf. H.N.)* *Mais 366 ans Moyen-Orient*		
Pays	**Production cumulée**	**Réserves**	**Ressources évaluées Non découvertes**	**Dotation totale estimée**
	Essentiellement méthane			
Etats-Unis	22,4	4,6	11,2	38,2
Canada	2,6	2,7	10,3	15,6
Mexique	0,8	2,0	4,4	7,2
Amérique du Sud	1,8	5,5	5,9	13,2
Europe Ouest	4,1	5,4	5,8	15,3
Russie + Ukraine	8,6	47,0	45	100,6
Transcaucasie + Asie Centrale	2,9	10,7	6,6	20,2
Moyen-Orient	2,1	44,3	31,5	77,9
Afrique + A.F.N.	1,1	9,6	12,4	23,1
Chine	0,5	1,7	7,3	9,5
Océanie + Asie sans Chine	2,0	8,3	13,0	23,3
Total Mondial	**48,9**	**141,8**	**153,4**	**344,1**

Charbon		
Pays	**Ressources géologiques**	**Réserves techniquement/économiquement recouvrables**
	En millions de tonnes "Equivalents"	
Australie	600 000	32 800
Canada	323 036	4 242
Chine	1 438 045	98 883
Allemagne	246 800	34 419
Inde	81 019	12 427
Pologne	139 750	59 600
Afrique du Sud	72 000	43 000
Royaume Uni	190 000	45 000
U.S.A.	2 570 398	166 950
Russie/Ukraine et Kazakhstan	4 860 000	109 900
Autres Pays	229 164	55 711
Total Mondial	**10 750 212**	**662 932**

Ces évaluations appellent plusieurs remarques :

Pour le pétrole

• "Dans les années 1960, les réserves mondiales de pétrole brut étaient de l'ordre de 300 milliards de barils. On parlait de "trente ans" de consommation (estimation purement statique, et donc trompeuse). Ces réserves dépassent aujourd'hui 1 000 milliards de barils ("quarante ans" de consommation)"
"Chaque année, on découvre plus de pétrole qu'on n'en consomme" (Claude Mandil - Président de l'Institut Français du Pétrole P.D.G. d'ISIS). "Les hydrocarbures : une industrie d'avenir" in "La Revue des Deux Mondes" Avril 2001.

• "De plus le taux de récupération est passé de 20% en 1970, à 30-35% en 2001. Une meilleure connaissance de la géométrie des gisements, par imagerie sismique, les progrès des techniques de forages, autorisent une prévision de taux de récupération supérieure à 35% : un point de récupération correspond à trois années de consommation mondiale".

• L'exploitation "off-shore" est passée d'une profondeur de 200 à 300 mètres d'eau à 2000 mètres (au large du Brésil, ou du Golfe de Guinée). Une perspective est envisagée à 3 000 mètres.

• *Les réserves de "bruts" et de "sables bitumeux" dépassent les réserves classiques, sous condition de validation de l'expérimentation des technologies.*
[Réf. Claude Mandil Loc. cit]

• Noter aussi la possibilité de fabriquer du pétrole synthétique en combinant du charbon ordinaire avec de l'hydrogène sous pression (Procédé Friedrich Bergius, savant allemand, Prix Nobel de chimie 1931).

Pour le gaz

Avant 1991, et la dissolution de l'U.R.S.S., les pays de l'Union Soviétique étaient les leaders mondiaux de la production de gaz naturel : Environ un tiers de la dotation totale... Les Etats-Unis possédaient des réserves importantes qu'ils ont consommées en grande partie avant de procéder à une réduction de plus de 10% à la fin du XX[ème] Siècle.

Les régions telles que : l'Amérique Latine, l'Europe de l'Ouest, l'Afrique, l'Asie, la région du Pacifique... bien que de dotations nettement plus faibles, possèdent encore des potentiels significatifs : ce qui explique la faveur du gaz dans plusieurs contrées (En France la consommation du gaz est passée de 2,5 Mtep en 1960 à 37,3 Mtep en 2000).
Si on met à part la Russie, les Etats-Unis et l'Iran, on note que 19 pays possèdent individuellement une dotation supérieure à : $2{,}8.10^{12} m^3$, soit en ordre décroissant : l'Arabie Saoudite, le Canada, la Chine, le Turkménistan, la Norvège, le Mexique, les Emirats Arabes Unis, le Nigéria, le Qatar, le Kazakhstan, le Vénézuéla, l'Indonésie, le Koweit, l'Australie, l'Algérie (Sahara), l'Ouzbékistan, la Malaisie, la Hollande et l'Ukraine rassemblent plus de 90% des réserves recouvrables. *(Réf. Encyclopedia Britannica Vol. 19. 1998, p.582).*
La genèse des gaz naturels est assez voisine de celle du pétrole : toutes les "roches mères" ont un potentiel de génération gazeuse : le pétrole contient des fractions si volatiles qu'elles sont à l'état de vapeurs aux températures ordinaires. Mais le gaz naturel migre beaucoup plus facilement. Le charbon constitue lui-même une roche mère pour le méthane... D'autre part des sources de méthane d'origine non organique ont été découvertes : elles peuvent être liées aux débris cosmiques carbonés dont la Terre s'est formée (à l'image des chondrites carbonacées des météorites). Mais surtout d'énormes quantités de méthane, les hydrates de méthane, sont concentrées dans le permafrost, sol perpétuellement gelé du plateau continental et des régions arctiques, notamment le Grand Nord. Mais l'exploitation de ces sources non conventionnelles, coûteuses, n'est pas sans risque : celui de libérer dans l'atmosphère des quantités importantes de méthane (gaz à "effet de serre" plus nocif que le gaz carbonique)
[voir plus loin : Le "Biogaz"].
L'utilisation du gaz naturel a le vent en poupe, même si son exploitation intensive n'a commencé qu'après la deuxième guerre mondiale.... Dès les années 1960, la puissance installée des turbines à gaz dans le monde était déjà supérieure à 2 000 MW, soit environ 2 000 installations dont 55 avaient une puissance unitaire supérieure à 10 MW...
Le choix par la France d'une politique volontariste favorisant la production d'électricité d'origine nucléaire - au niveau de près de 80% - explique la part du gaz dans notre pays : 14% , au lieu de 30% en Italie, ou encore 22% en Allemagne.
Des possibilités d'expansion existent ; de grands marchés s'ouvrent au gaz : l'Inde, la Chine... Et le gaz représente une énergie propre, contrairement au pétrole et au charbon surtout (qui représente aujourd'hui 25% de la consommation

d'énergie commerciale dans le monde). Les réserves mondiales disponibles du charbon (anthracite, lignite…), soit plus de 650 milliards de tonnes, sont susceptibles de couvrir les besoins mondiaux pendant des centaines d'années. Mais la consommation intensive pose un problème majeur par son action sur l'environnement.

"Les Japonais voient avec désolation leurs belles forêts sacrées se détériorer à cause des pluies acides (dues plus au charbon qu'au pétrole)… à cause des pluies acides provoquées par les centrales chinoises et soufflées au-dessus de la Mer du Japon". [Hubert Reeves. Loc.cit p.72]

2 - Pollutions comparées des combustibles fossiles

Le tableau réalisé à partir des statistiques d'Hervé Nifenecker dans le Bulletin de la Société Française de Physique (N° 118. Mars 1999 p. 26-29) indique les taux d'émission de CO_2, SO_2 et NO_2 pour une production d'énergie de 1 kWh. On remarquera la position privilégiée, en vue d'une énergie relativement propre, de l'hydroélectrique, puis du gaz d'une part, de la cogénération d'autre part, (voire la trigénération illustrée plus loin), et du nucléaire. Les données alarmantes relatives au charbon fondent les choix énergétiques d'un certain nombre de pays, dont la France (indépendamment du niveau de leurs ressources).

La situation de la Chine est particulière : l'émission du gaz carbonique, en tonnes par habitant, peut paraître extraordinairement faible : seulement 2,5. Mais il faut mettre en regard le Produit Intérieur Brut d'une part, et d'autre part l'importance exceptionnelle des réserves de charbon et le potentiel chaque jour manifesté du développement économique d'un pays d'un milliard deux cent millions d'habitants. On voit mal la Chine renoncer à fonder l'essentiel de son expansion industrielle sur le charbon : les prévisions du Conseil Mondial de l'Energie (C.M.E.) conduiraient dans l'hypothèse du scénario le plus "charbonnier ", à une consommation en 2050 de 3 milliards de tonnes de charbons : or trois milliards de tonnes de carbone correspondent à la moitié des émissions mondiales actuelles *["L'Energie, un défi planétaire". Benjamin Dessus Ed. Débats Belin 1999].*

3 - Action sur l'environnement : Le gaz carbonique est, quantitativement, le gaz à effet de serre par excellence. (Même si le méthane, 10 à 20 fois plus efficace, doit être l'objet d'une vigilance accrue :

"En particulier un réchauffement élevé aux grandes latitudes risquerait de libérer des quantités gigantesques de méthane actuellement prisonnier du permafrost, ce qui provoquerait une bouffée de chaleur supplémentaire au niveau de la Planète" [Hervé Nifenecker in "L'Energie nucléaire a-t-elle un avenir ?" Ed. Le Pommier juin 2003].

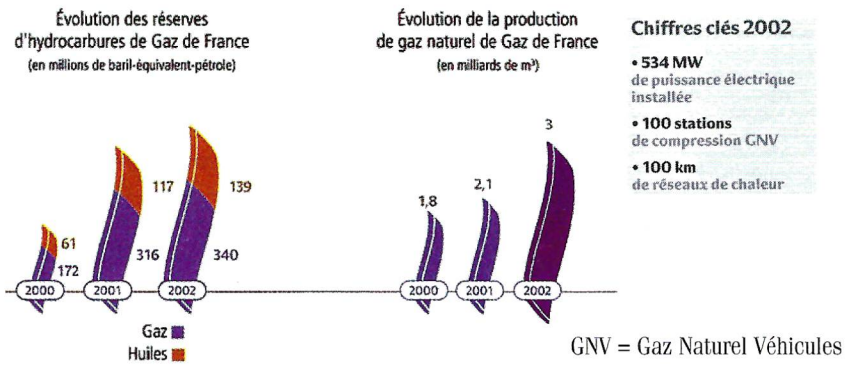


Figure 18 - (Réf. : Gaz De France (G.D.F.), Rapport annuel 2002 - Courtoisie M. Fedespina

	Pays	Energie dominante	CO_2 tonnes/habitant par an	SO_2 tonnes/habitant par an	NO_2 tonnes/habitant par an
1	Suisse	Hydroélectricité	7,1	10	28
2	Norvège	Gaz	7,5	12	55
3	Pays-Bas	Gaz	12,5	14	37
4	Suède	Hydro Nucléaire	7,0	20	45
5	France	Nucléaire	7,0	20	30
6	Grande-Bretagne	Charbon	11,0	68	49
7	Allemagne	Charbon	13,0	70	40
8	Pologne	Charbon	14,0	70	30
9	Canada	Charbon	17,0	140	70
10	Etats-Unis	Charbon	20,0	85	78
11	C.E.I.	Charbon + gaz	12,5		
12	Japon	Fioul + nucléaire	8,0	?	?

Mais qu'est-ce que l'effet de serre ?

L'effet de serre est un phénomène naturel identifié depuis près de deux siècles. Il est utilisé par tous les jardiniers. Les rayons de soleil qui traversent l'atmosphère viennent chauffer la surface de la terre. Le sol ainsi réchauffé réémet vers l'atmosphère le rayonnement infrarouge (à la manière du "corps noir" de la thermodynamique). La vapeur d'eau, dont la contribution est essentielle, le gaz carbonique, le méthane, l'oxyde nitreux N_2O… de l'atmosphère forment une couche qui fait office de "plaque de verre des jardiniers" en piégeant les rayons infrarouges. Il en résulte une augmentation de température de l'atmosphère, et le maintien à la surface de la terre d'une température moyenne de 15°C. Sans l'effet de serre, elle serait de -18°C. L'effet de serre est donc nécessaire : notamment à l'apparition de la vie sur Terre. La nouveauté tient aux modifications radicales apportées par l'activité humaine (agriculture, industrie, production d'énergie, transports). La concentration en CO_2 a augmenté de 30%, celle du méthane de 145%, celle de l'oxyde nitreux de 15%.

L'action sur la couche d'ozone ne doit pas être confondue avec l'effet de serre.

D'autres polluants, totalement nouveaux, les chlorofluorures de carbone (CFC) utilisés jusqu'à l'interdiction de 1987 (protocole de Montréal), et fabriqués au rythme de millions de tonnes par an… se sont accumulés dans l'atmosphère, atteignant la stratosphère : les rayons ultraviolets transforment alors ces CFC, produisant des molécules chlorées qui attaquent et détruisent rapidement la couche d'ozone protectrice. L'interdiction de Montréal, conséquence heureuse d'une analyse scientifique, a ralenti cette action nocive. [D'autres constituants : oxyde nitreux émis par la combustion dans les moteurs ou par l'épandage excessif d'engrais azotés, le fluorure de soufre SF_6… doivent être piégés… pour que la couche d'ozone retrouve (dans un siècle ?!…) son intégrité initiale.]

Pluies acides

Les deux autres résidus gazeux des combustibles fossiles : oxydes de soufre et d'azote sont les précurseurs des pluies acides : dans le cas de la Chine les retombées de soufre atteignent plusieurs tonnes par km² en une seule année (soit plusieurs grammes par m²).

En tous pays, les centrales au charbon sont les grands responsables des pluies acides : les oxydes de soufre et d'azote crachés par leurs cheminées en même temps que des aérosols se combinent avec la vapeur d'eau d'où la formation des pluies acides. Des solutions existent, pratiquées en Amérique du Nord, en Europe de l'Ouest : la pose de filtres recommandée par une Convention en 1990, mais qui ne s'applique ni en Chine, Inde, ou Europe de l'Est.
(voir plus loin le cas du pétrole)

Le problème complexe du gaz carbonique

Avant l'ère industrielle, la situation était proche de l'équilibre quant aux quantités de CO_2 absorbé et rejeté par la mer et la terre. L'atmosphère conservait ainsi une proportion constante de gaz carbonique. Aujourd'hui, nous émettons annuellement 24 milliards de tonnes de CO_2. Or l'Histoire des ères géologiques a montré une étroite corrélation "Teneur en CO_2/Température" pendant les grandes glaciations. L'augmentation de plus de 25% depuis 1900 nous fait rejoindre la teneur en CO_2 la plus élevée depuis 400 000 ans. *[Réf. "Carbon emissions reach new high" in "Vital Signs" 2002. p.2 cité par Hubert Reeves, "Le Mal de Terre" Seuil mars 2003 p.43].*

Dans le scénario A du C.M.E. (Conseil Mondial de l'Energie) (croissance soutenue de la richesse mondiale au rythme annuel de 2,6%, sans effort exceptionnel dans le domaine des économies d'énergie) la teneur de CO_2 passerait à 4 000 Gt en 2100…

"Que fera alors l'Océan ? Il ne semble pas qu'il puisse continuer à absorber 50% de nos émissions. Il pourrait même se transformer en source de CO_2 et provoquer une augmentation de température de 5°C !".

Prévision apocalyptique excessive ? Tout au moins faut-il souligner avec Hubert Reeves et Hervé Nifenecker, même si les solutions qu'ils proposent sont radicalement différentes, la nécessité d'une démarche de sagesse et d'une mise en œuvre d'un principe de précaution : phénomènes météorologiques cataclysmiques, développement de grandes endémies, réveil "du dragon enfoui dans les glaces" (le méthane) évoqué par Hubert Reeves ne seraient pas de simples hypothèses d'école.

Existe-t-il des répliques ?

• **Ralentissement de l'utilisation des combustibles fossiles ! ?**

Sauf par la mise en œuvre rationnelle de la Cogénération là où des opportunités existent, et déploiement d'une politique volontariste d'économies, ce ralentissement est pratiquement impossible pour beaucoup, tout au moins dans les vingt années qui viennent, en raison particulièrement de l'extrême commodité d'usage du pétrole et du gaz naturel.

Reste la séquestration. Nous nous inspirons ici de la contribution de Claude Mandil - Ingénieur Général des Mines **(Loc. cit)**

• **Séquestration des CO_2, par compression** puis injection dans le sous-sol (les gisements d'huile ou de gaz, après exploitation, sont d'excellents pièges à gaz carbonique). Reste le coût du transport entre site de production et site d'injection.

• **Séquestration chimique** : piéger le CO_2 dans une roche sous forme solide ; Expérimentation délicate aux U.S.A. : comment réaliser en un court délai ce que la Nature n'a pu réussir en moins de quelques millions d'années ?

• **Séquestration biochimique** par fixation du CO_2 sous forme "solide" dans le vivant, faune et flore :
- Coquillages, huîtres, moules
- Bois, cellulose
- Séquestration temporaire par reforestation de zones importantes (stockage d'attente)

• La culture des algues permet une fixation du CO_2 pour une durée plus brève que le bois et la cellulose. Les Etats-Unis, qui ne veulent pas toucher à leurs habitudes de consommation énergétique et désirent devenir le premier grand vendeur de "droits à polluer" dans la perspective "Kyoto", retiennent la séquestration du gaz carbonique comme axe stratégique : avec réductions du coût de la séquestration d'une tonne de carbone à 10 dollars avant 2015 *[Projet "DOE" Department Of Energy] "C'est un défi posé à l'Europe" (C. Mandil)*

Action du pétrole sur l'environnement

Nous devons analyser maintenant le cas spécifique du pétrole, en raison de sa position dominante dans les transports :

"A L'horizon 2020, la Chine et les Etats-Unis auront tous les deux recours au pétrole venu du Moyen-Orient, à 70% de la consommation totale" :

- Problème géopolitique et environnemental (qualité de l'air, réchauffement de la planète)

- Problème de sécurité énergétique

(John Boesel, Président de l'organisme non lucratif CALSTART - Californie. Conférencier au Challenge Bibendum 2003).

Plusieurs sources et plusieurs voies de pollution liées au pétrole doivent être examinées : les sources, l'exploitation.

Les sources d'abord

Nous l'avons dit, les hydrocarbures, en plus de leurs constituants fondamentaux carbone et hydrogène, comportent des doses plus ou moins importantes de soufre, d'azote et d'oxygène.

Dans les huiles brutes de Pennsylvanie le pourcentage de soufre est de 0,05%, il atteint 2% dans les pétroles du Moyen-Orient et 5% ou plus dans les hydrocarbures du Mexique ou du Mississippi. La combustion du pétrole forme de l'anhydride sulfureux SO_2 qui s'oxyde partiellement à l'air pour former l'anhydride sulfurique SO_3, lequel au contact de l'eau donne de l'acide sulfurique H_2SO_4

De même les oxydes d'azote NO et NO_2, oxydent des molécules d'oxygène atmosphérique O_2 en molécules d'ozone O_3, toxique et irritant ; par sa capacité d'oxydation il modifie la perméabilité des membranes cellulaires et **perturbe la photosphère et la respiration**, la combinaison des dioxydes d'azote avec la vapeur d'eau des nuages forme l'acide nitrique.

Les acides sulfurique et nitrique engendrent ainsi des pluies acides. Aux U.S.A., en Europe de l'Ouest, des pH de 2 et 3 ont été observés (donc très acides), on a de plus observé que de telles pluies dissolvent l'aluminium et deviennent très toxiques pour la faune aquatique.

Très généralement ces pluies acides provoquent de sérieux dommages à de multiples formes de végétation : arbres, moissons, principalement en inhibant la fixation d'azote et en extrayant par percolation les nutriments des feuillages.

De plus ces polluants provoquent la corrosion des surfaces externes des bâtiments ou autres structures. Dans certaines mégapoles (Los Angeles, San Francisco, Londres) les brouillards sont 10 fois plus chargés en polluants que les pluies acides "ordinaires".

Dans le seul cas du pétrole, il est important de garder en mémoire les niveaux d'émission de CO_2, SO_2 et NO_2 pour 1 kilowatt/heure de production énergétique (sans cogénération), soit : de 0,70 à 0,80 kg de CO_2 - 5 g de SO_2 - 1,80 g de NO_2 (même si le pétrole est moins polluant que le charbon… il est plus polluant que le gaz naturel.)

Eléments métalliques : Plusieurs métaux se trouvent dans le pétrole brut, incluant la plupart des éléments présents dans l'eau de mer (en raison de la liaison étroite entre eau de mer et formes organiques qui engendrent le brut) : les plus communs sont le vanadium et le nickel…

Pollutions liées à l'exploitation

1 - Pollution due aux activités chimiques : c'est la plus facile à éviter aujourd'hui grâce aux progrès des sciences et des techniques (analyse chimique en continu, informatique, robotique).

Trois types d'activités :

• Le raffinage qui traite le pétrole brut et le transforme en carburants divers (liquides ou gazeux),

• La pétrochimie transforme, directement ou non, les produits finis ou semi-finis.

Ainsi les matières plastiques, les fibres synthétiques, les caoutchoucs synthétiques, résines, matières colorantes, produits photographiques, engrais, produits phyto-sanitaires.

Il faut y ajouter les industries transformatrices dites aussi "parachimiques" qui

risquent de contaminer l'atmosphère (fabrication de peintures, de vernis, colles, adhésifs et adjuvants plus ou moins nocifs).

2 - Pollution par les combustibles liquides ou gazeux d'origine pétrolière : **L'utilisation des hydrocarbures liquides produits dans les raffineries se répartit ainsi :**

- Fuel domestique pour le chauffage
- Essence ou gazole pour les moteurs à explosion
- Kérosène pour les réacteurs d'avions
- Fuel lourd pour certaines centrales électriques thermiques

Diverses réglementations ou divers procédés tendent à limiter l'émission de SO_2 à 0,2%.

Les combustibles gazeux d'origine pétrolière sont également produits dans les raffineries :

- Le butane C_4H_{10} vendu liquéfié dans des bouteilles de 13 kg (usages domestiques)
- Le propane C_3H_8 (chauffage dans les régions rurales) vendu liquide sous pression
- Le G.P.L. (gaz de pétrole liquéfié), mélange liquide sous pression de butane et de propane, permet une combustion totale pratiquement sans aucune pollution atmosphérique.

• Les transports :

Sous la pression des pouvoirs publics, on peut dire que la majorité des véhicules à moteur et diesel, fabriqués en France et mis en circulation depuis 1993 sont beaucoup moins polluants, à condition que leur réglage soit correct. (Nous savons que tout moteur diesel mal réglé dégage des flots de particules de carbone qui forment les fumées noires qu'il nous arrive de respirer). Même pour ces moteurs diesel des pièges efficaces ont été mis en place depuis 1996 : C'est ainsi que les autobus de la RATP, fonctionnant au diesel, sont très peu polluants.

• Le résultat ?

On ne peut séparer l'influence des hydrocarbures de celle des autres combustibles fossiles (charbon, gaz naturel). Mais pour des raisons évidentes, les moyens de transport dépendent du seul pétrole. A la faveur d'une technologie de plus en plus pertinente, le moteur thermique améliore son rendement en se faisant moins polluant : L'introduction de l'injection directe a réduit la consommation par rapport au carburant classique.
La généralisation du pot catalytique et des filtres a contribué à baisser les taux d'émission de gaz polluants, voire toxiques. Le G.P.L. se développe lentement en France, contrairement à l'Italie par exemple.

Le graphique suivant, du Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique - CITEPA - rapporté par la Revue "Futurible" de septembre 2002... semble à première vue minimiser le rôle des différents hydrocarbures en matière de transport.

Les bus au gaz naturel se développent en France.

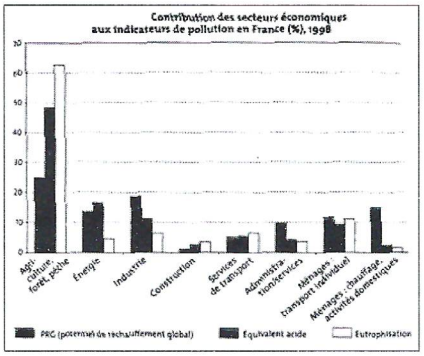


Figure 19 - (Réf. : Sfen d'après Citepa (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique)

"En terme de potentiel de réchauffement climatique : les activités relatives à l'agriculture, la forêt et la pêche cumulent en **1998** 25% des émissions de gaz à effet de serre, à peine devancées par les ménages (incluant transports et chauffage). Ils pèsent ainsi nettement plus qu'en 1990. La part de l'industrie diminue légèrement, passant de 21 à 19%, de même que celle de la production d'énergie qui connaît une diminution semblable. Mais l**e transport routier, utilisé par chacun des secteurs** demeure la principale source d'émission de gaz à effet de serre et progresse de **14 à 18%** en huit ans".

En résumé, en plus du CO_2, sept types d'agents polluants présents dans les gaz d'échappement doivent être pris en chasse par la surveillance de la qualité de l'environnement.

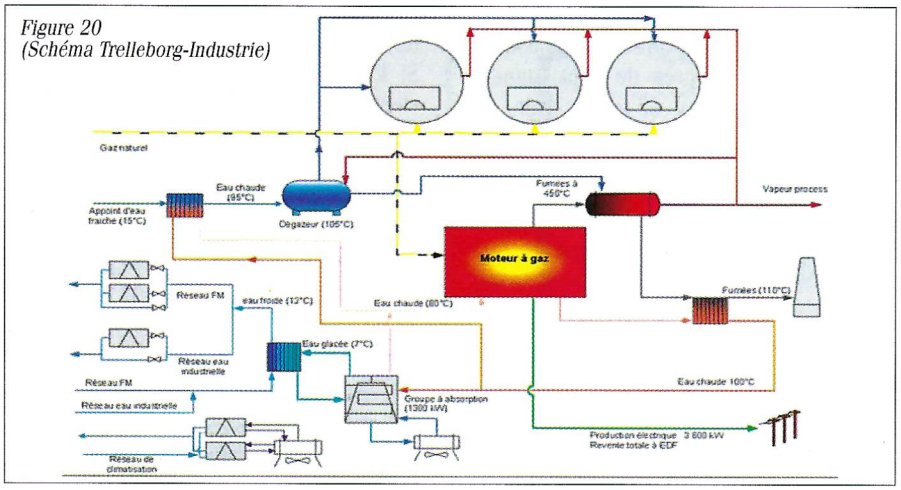
- Les oxydes d'azote, dont le redoutable NO_2 qui s'attaque aux bronches et au pouvoir du sang
- Le monoxyde de carbone CO, gaz asphyxiant
- Les composés organiques volatils
- Les hydrocarbures non utilisés au cours de la combustion
- Les particules de fumées noires
- Le dioxyde de soufre, principal responsable avec les oxydes d'azote de pluies acides
- Le plomb, "en fin de carrière" : l'accroissement du nombre de véhicules à essence a conduit les pétroliers à produire de l'essence sans plomb à haut indice d'octane, et les constructeurs à fabriquer des moteurs pouvant se passer d'additifs au plomb (plomb tétraméthyle ou plomb tétraéthyle) qui avaient pour but la lubrification des tiges de leurs soupapes pour éviter le "cliquetis ".
- Enfin l'ozone déjà évoqué. Les contrôles techniques sont en principe un moyen de contribuer à rendre les véhicules plus propres.

Les nouvelles normes : réductions de la teneur des éléments polluants de 50% en 2005, de 80% en 2020... se heurtent au taux de renouvellement du parc automobile, mais indiquent la voie.

Le pétrole s'est peu à peu imposé comme source d'énergie commode : contrairement au gaz qui exige des canalisations fixes, le pétrole est aisément transportable. C'est justement son transport massif - aujourd'hui dans des "super-tankers" dont les plus longs atteignent 350 mètres - qui pose à l'heure actuelle un grave problème, après les "marées noires" successives, Amoco Cadix, Exxon Valdes, Prestige, Erika...,
L'arrivée des masses gluantes envahissantes qui paralysent la pêche, tuent des milliers d'oiseaux et nuisent gravement à tout l'environnement côtier. La même société internationale responsable de la catastrophe écologique des Côtes d'Armor et qui n'a pas été condamnée à dédommager honnêtement les populations concernées, a dans le même temps, construit à Chicago une tour de 412 mètres revêtue de marbre de Carrare issu d'une mine pillée à cette occasion. Comme cette "pellicule" de marbre n'a pas supporté les variations hygrométriques des abords du Lac Michigan, la solution adoptée fut de concasser le tout à des fins de génie routier avant de choisir un autre revêtement...

Conclusion : ceci étant, s'agissant des transports, polluants majeurs, il est clair que la mise en route de propulsions de substitution sera une affaire d'une ou deux générations, avant que la propulsion électrique et la voiture dite "à hydrogène" - réalisées aujourd'hui dans des situations très déterminées et non généralisables - ne s'imposent comme voies normales, même si des ruptures technologiques - imprévisibles par définition - peuvent cependant bouleverser toute précision.
D'où l'importance des normes strictes : carburants, filtres, etc... (les oxydes sulfureux sont en diminution).
Mais *"Les Japonais voient avec désolation leurs belles forêts sacrées se détériorer à cause des pluies acides (dues plus au charbon qu'au pétrole)... à cause des pluies acides provoquées par les centrales chinoises et soufflées au-dessus de la Mer du Japon" (Hubert Reeves, Loc. cit p. 72)*
Nous suivons globalement Hubert Reeves lorsque, dans Mal de Terre *[Hubert Reeves avec Frédéric Lenoir. Ed. Seuil. Science ouverte - Avril 3003]* il écrit : "Il y a mieux à faire avec ces substances - notamment les hydrocarbures - que de les brûler ! Comment par exemple, fabriquerons-nous le plastique et l'asphalte quand le pétrole sera épuisé"...
Au rythme actuel de consommation, les réserves de pétrole seront épuisées avant la fin du XXI^{ème} Siècle... Pour le pétrole, comme pour le gaz, toutes les formes d'économie doivent être exploitées.

Figure 20
(Schéma Trelleborg-Industrie)



4 - Un exemple de centrale de trigénération avec moteur à gaz

La Société TRELLEBORG-INDUSTRIE, implantée au cœur de l'Auvergne, et spécialisée dans la production de tuyaux en caoutchouc industriels (tous usages depuis les tubes gaz jusqu'aux tuyaux "offshore" très gros diamètres), s'est engagée dans une démarche de certification dite ISO 14001. Trelleborg-Industrie a donc demandé à son partenaire IDEX & Cie. d'apporter des solutions visant une réduction de l'impact environnemental des installations énergétiques.

Après diagnostic, la mise en place a été décidée d'une trigénération produisant simultanément de l'électricité, de la chaleur (sous forme de vapeur et d'eau chaude) et du froid par l'intermédiaire d'un groupe d'absorption.

La chaudière initiale, alimentée en fioul lourd, a été convertie au gaz naturel, le moins polluant des combustibles fossiles.

Les performances garanties sont les suivantes :

Puissance électrique nette : **3 600 kW**

Production thermique vapeur à 100°C et 12 bars : **2,23 tonnes par heure**

Production d'eau glacée à 5°C : **1 300 kW**

Production d'eau chaude : **850 kW**

Puissance thermique : **9 406 kW**$_{PCI}$

Contraintes :

• L'électricité est revendue à E.D.F. (dont la centrale respecte les exigences de qualité, de situations de points...), ceci dans le cadre de l'obligation d'achat décidée par le gouvernement afin d'atteindre les objectifs du protocole de Kyoto.

• Des variations très importantes de consommation de vapeur sur des périodes courtes (de 2 t/h à 12 t/h en quelques minutes).

• Schéma de principe de l'installation (Figure 20).

• Bilan énergétique sur une saison de fonctionnement (Depuis janvier 2003)

Rendement : En trigénération, le rendement global dépasse 80% ; 94% de l'énergie thermique est consommée sur le site.

Gains et Bilans : L'opération Trelleborg Industrie - IDEX, d'un montant de 4,5 M Euros, a reçu le soutien de l'ADEME, du FEDER et de l'Agence de l'Eau Régionale, du fait des fortes réductions attendues :

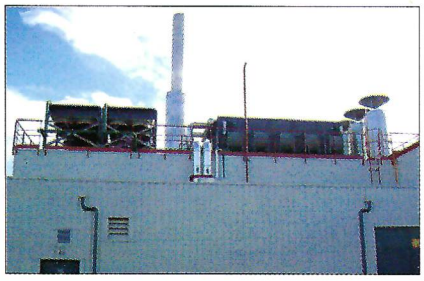
A. AIR : Rejets avant 2003 avec combustible fioul lourd :

- Oxydes de soufre : 7,33 kg/MWh
- Oxydes d'azote (NOx) : 0,623 kg/MWh
- Gaz carbonique : 0,28 tonne/MWh

Rejets depuis janvier 2003 avec combustible gaz naturel :

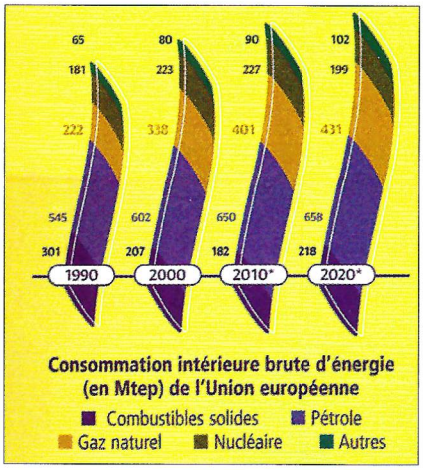
- Oxydes de soufre : 0,003 kg/MWh : - 100%
- Oxydes d'azote (NOx) : 0,343 kg/MWh : - 45%
- Gaz carbonique : 0,1975 tonne/MWh : - 30%

B. EAU : Réduction de la consommation d'eau de ville : - 238 000 m³/an
- 68%





Figures 21 et 22 - clichés pris chez Trelleborg-Industrie - Courtoisie MM. G. Aubry et R. Colley



**estimations - Figure 23*
(Source : Livre vert sur la sécurité de l'approvisionnement en énergie, Commission Européeene)
(Réf. : Rapport annuel G.D.F. 2002
Courtoisie M.Fedespina)

Piste 6

L'énergie nucléaire de fission, hier, aujourd'hui et demain..., ses défis

Son histoire est "glorieuse et tragique". Elle nous paraît demeurer aujourd'hui aussi porteuse qu'elle l'était dans les années 1970, sous condition d'exigence éthique sur des points précis.

1 - L'histoire de l'énergie nucléaire commence en 1896 avec la découverte de la Radioactivité, couronnée par celle de la Physique Nucléaire. Puis surgissent la découverte du neutron, et celle de la "radioactivité artificielle".

A la mi-octobre 1934 Lise Meitner et l'équipe "Enrico Fermi" présentent et mettent en évidence une augmentation dramatique du taux de réactions induites par des neutrons ralentis, dits thermiques.

En 1939, Otto Hahn et Fritz Strassmann découvrent des métaux alcalino-terreux lors de l'irradiation d'uranium 235 par des neutrons thermiques. Aussitôt, Lise Meitner et Otto Frisch, exilés, suggèrent que lors de l'absorption d'un neutron, le noyau d'uranium se trouve suffisamment excité pour se fractionner en deux parts "approximativement égales": La fission nucléaire vient d'être découverte. (La récompense suprême, le prix Nobel de Chimie 1945 couronnera Otto Hahn seul).

En 1939 également, alors que la situation internationale est de plus en plus grave, Frédéric Joliot, Hans von Halban et Lew Kowarski à Paris, suivis immédiatement par Herbert Anderson, Enrico Fermi, Léo Gzilard, et H.B. Hanstein à l'Université de Columbia, reconnaissent l'émission de plusieurs neutrons au cours de la fission

nucléaire. Ces neutrons peuvent à leur tour, sous certaines conditions, donner lieu à la fission de nouveaux noyaux d'uranium.

Deux voix s'ouvrent alors :

- Une réaction en chaîne contrôlée amènera à un régime stationnaire, fournissant une nouvelle forme d'énergie

- Une réaction rapide et incontrôlée conduira à une forme explosive



Figure 24 - Lise Meitner en 1900 (Réf. "Lise Meitner" A life in Physics par Ruth Lewin Sime. University of California Press. Berkeley and Los Los Angeles California. London England. California Studies in the History of Sciences, Vol. 13, J.L. Heilbronn, editor. Libray of Congress Cataloguing - in Publication Dum Sime, Ruth Lewin 1939 - Second paperpack printing 1997)

Lise Meitner avait la première montré que l'énergie libérée par une fission nucléaire provenait de la différence d'énergie de liaison entre les nucléons du noyau initial (en fait l'uranium 235) et celle des produits de fissions ; c'était une simple application de deux lois associées :

- Conservation de l'Energie

- Equivalence masse/énergie : $E = mc^2$

Trois noyaux cibles différents sont fissiles par capture de neutrons lents (ou thermiques). Nous indiquons, pour chacun, le nombre moyen de neutrons rapides émis

Uranium 233	$\nu = 2{,}51$
Uranium 235	$\nu = 2{,}47$
Plutonium 239	$\nu = 2{,}91$

Exemples de fission

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U^* \rightarrow ^{144}_{56}Ba + ^{89}_{36}Kr + 3\,^{1}_{0}n$$

ou encore :

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{236}_{92}U^* \rightarrow ^{140}_{54}Xe + ^{94}_{38}Sr + 2\,^{1}_{0}n$$

$^{236}_{92}U^*$ est un noyau hautement excité qui se brise presque instantanément en fragments de fission

Au total, cette réaction fournit environ 200 MeV, soit $3{,}2.\ 10^{-11}$ joule. Il faut donc 31 milliards de fissions pour produire un joule. La fission de tous les noyaux d'un gramme d'uranium émet environ 1 mégajoule. Ce qui équivaut à la combustion de plus de deux tonnes et demie de charbon, combustion qui exige de plus près de sept tonnes d'oxygène, donc environ 35 tonnes d'air.

Réactions en chaîne : Imaginons les fissions engendrées (sans pertes) par 2 neutrons en séquence :
Pour chaque neutron donnant une fission initiale nous aurions 2 neutrons à la première génération,
2 x 2 = 4 à la seconde
2^3 à la troisième
2^{70} à la 70ème (soit près de $1{,}2.\ 10^{21}$)

Entre 2 générations, il s'écoule de l'ordre de 10^{-8} seconde ! on imagine quelle énorme énergie peut être libérée en une fraction de microseconde.
Mais un réacteur nucléaire est rempli de matériaux divers : Uranium 238, uranium 235, fragments de fission.

L'existence des nouveaux neutrons engendrés s'achève de trois façons :
- fissions nouvelles
- captures par des noyaux non fissiles
- fuites hors du réacteur

Trois types de situations sont alors possibles ; on désigne par k le rapport du nombre de neutrons à la $(n+1)^{ème}$ génération et le nombre de neutrons à la $n^{ème}$ génération.
Si k > 1 - Accélération du nombre de fissions. Système sur-critique
Si k < 1 - La réaction en chaîne va s'arrêter. Système sous-critique
Si **k = 1** - Le nombre de neutrons, la vitesse de réaction et la puissance dégagée sont constants. Système critique

Quelques dates

• 2 août 1940. Lettre d'Albert Einstein au Président Roosevelt sur les possibilités d'application militaire de l'énergie atomique

• Septembre 1942. "Manhattan District"

• 2 décembre 1942. Enrico Fermi fait fonctionner la première pile atomique sous les gradins d'un stade de Chicago.

• 16 juillet 1945, 5h30 : Premier feu nucléaire dans le ciel d'Alamogordo (Nouveau Mexique).

• 6 août 1945. « Little Boy » est lancée sur Hiroshima (80 000 morts immédiates)

• 9 août 1945. Nagasaki, "protégée par un éperon rocheux"... 40 000 morts

• Au total : 350 000 victimes à Hiroshima

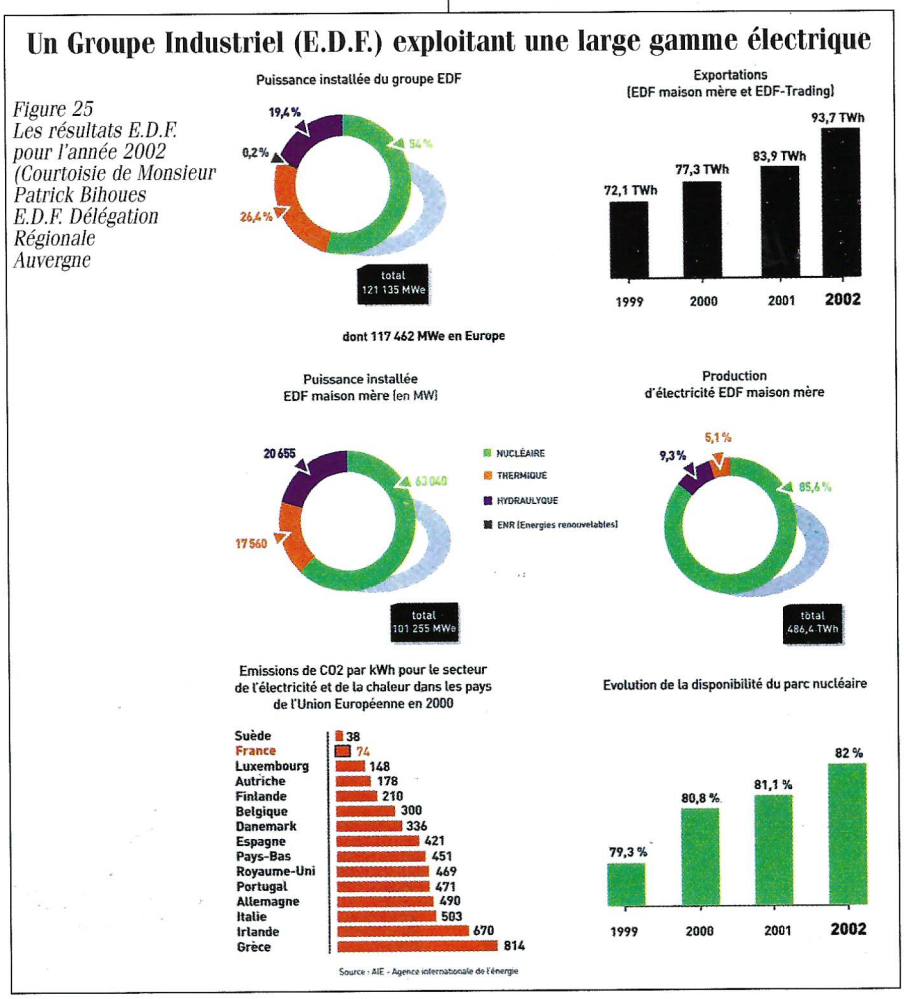
• 270 000 victimes à Nagasaki

• 15 décembre 1948. ZOE "diverge" au Fort de Chatillon à 12h12 min. (Puissance Zéro, Oxyde d'Uranium, Eau lourde)

La France aujourd'hui

La France possède aujourd'hui 58 unités électronucléaires qui déploient une puissance totale voisine de 63 000 Megawatts électriques.

Figure 25
Les résultats E.D.F. pour l'année 2002 (Courtoisie de Monsieur Patrick Bihoues E.D.F. Délégation Régionale Auvergne



Constitution d'une Centrale à neutrons lents (ou thermiques)

L'énergie est fournie par les réactions de fission contrôlées pour rester en régime critique. Le combustible généralement utilisé est de l'uranium 235 enrichi à 3%, sous forme de pastilles d'oxyde. Ces pastilles sont enfermées dans des tubes à leur tour assemblés en faisceaux.

Le cœur du réacteur ainsi constitué est suspendu à l'intérieur d'une cuve en acier. Dans ce cœur circule de **l'eau sous pression**, à grande vitesse et qui sert de MODERATEUR - ou ralentisseur de neutrons, pour les ramener au régime "thermique" - de REFRIGERATEUR (sa grande vitesse est destinée à éviter un emballement de la réaction) et de FLUIDE CALOPORTEUR. Dans les **réacteurs à eau pressurisée** (PWR), l'eau qui s'échauffe au contact des assemblages d'uranium circule en circuit fermé (ou primaire). Ce dernier transmet sa chaleur à l'eau d'un second circuit ; l'enceinte du réacteur et le circuit de refroidissement primaire sont maintenus à environ 140 kilogrammes par cm² - pour que l'eau puisse atteindre sans bouillir de hautes températures (280 à 300°C). Le second circuit, sans aucun contact physique entre les fluides des deux circuits, est porté à ébullition. LE GENERATEUR DE VAPEUR fournit de la vapeur à la TURBINE qui entraîne l'ALTERNATEUR.
Après le passage par un CONDENSEUR, la vapeur, redevenue liquide, est renvoyée par une pompe dans le générateur pour une nouvelle ébullition. Une enceinte de confinement enfermant le tout garantit l'étanchéité du bâtiment.

On notera sur le schéma la présence et la position des barres de contrôle (cadmium, ou bore... éléments neutrophages) qui assurent :
- la sécurité, en servant éventuellement d'extincteurs nucléaires
- le réglage (ou pilotage) en ajustant le coefficient k autour de la valeur critique

On appelle "Filière" un ensemble de réacteurs ayant des caractéristiques de conception analogues. La France a choisi la filière à uranium enrichi et eau pressurisée (PWR).

L'usine **"Georges Besse Eurodif"** (10,8 millions d'unités de mesure de séparation isotopique) assure actuellement l'approvisionnement annuel de 100 réacteurs de 900 MW électriques.
D'où une économie de 140 millions de tonnes de pétrole ou 200 millions de tonnes de charbon.

2 - Critiques du nucléaire de fission

Deux types d'objections sont adressées au programme nucléaire français, et plus généralement à l'énergie de fission :
Les déchets nucléaires
L'effet Tchernobyl

Nous devons examiner ces critiques séparément.

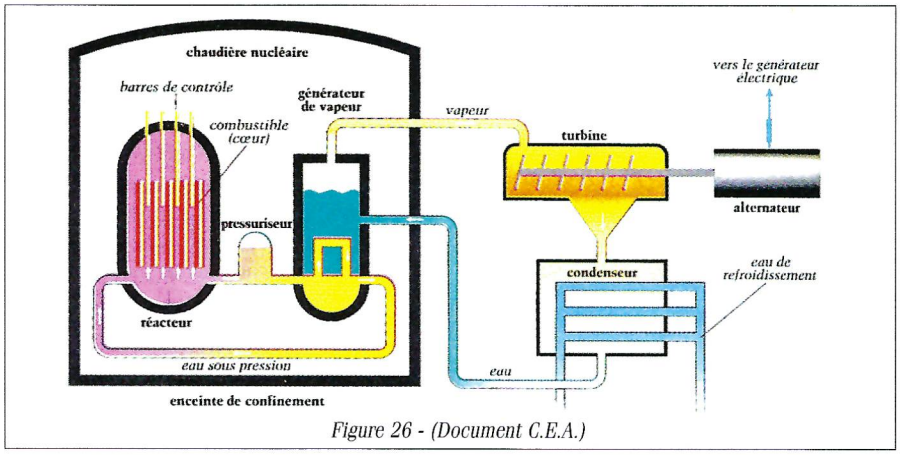


Figure 26 - (Document C.E.A.)

2.1 - Les déchets nucléaires :

Les déchets nucléaires, produits inévitables des réactions de fission, sont, en eux-mêmes nocifs. Ils sont également aisément détectables et mesurables avec précision. "Ils constituent un objet privilégié de communication de la part de ceux qui contestent le nucléaire civil, et qui préfèrent ignorer les autres déchets industriels".

Or les déchets nucléaires ne représentent qu'une part infime de la totalité des déchets : La France produit, chaque année, 3 tonnes de déchets industriels par habitant, dont 100 kilogrammes toxiques. Sur ces 100 kilogrammes, 1 kg est d'origine nucléaire, dont seulement 5 grammes sont fortement toxiques. La fourniture de l'électricité d'une personne pendant 75 ans de vie est équivalente, en déchets de haute activité, au volume d'une cannette de bière. Mais le problème n'en est pas moins réel : cette "cannette" est loin d'être banale !
La recherche, comme le traitement des déchets, doivent être permanents : comment réduire le caractère nocif des déchets et les isoler davantage de notre environnement et de celui des générations futures ?

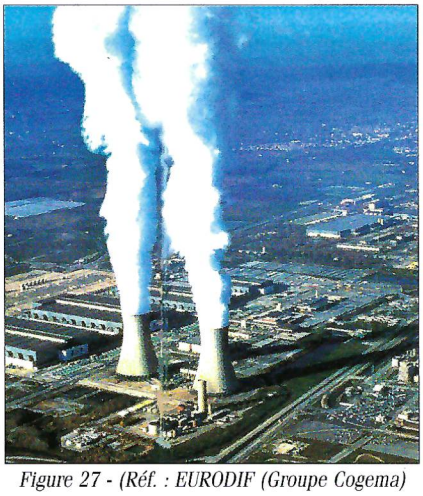
La France a choisi un traitement spécifique des trois types de déchets : A, B et C. Pour des raisons de clarté, nous conservons cette classification abandonnée des spécialistes. Si nous supposons que chacune des centrales aura fonctionné de façon conventionnelle pendant 40 ans, les volumes des déchets - y compris les phases antérieures - seront de l'ordre de :

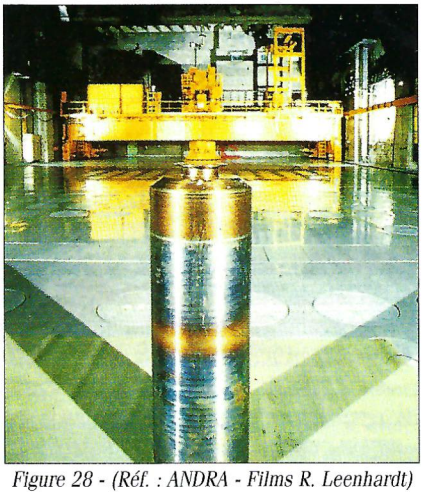
- 1 million de m³ pour les déchets A
- 75 000 m³ pour les déchets B
- 5 000 m³ pour les déchets C

• Dès 1950, la France - première au monde - a mis au point le procédé de vitrification qui permet d'emprisonner **les déchets C de haute activité** (ils constituent de loin le problème majeur). Ils sont d'abord transformés en un mélange de fins résidus solides. La longévité des enceintes - sévèrement contrôlée - est supérieure à la durée de la nocivité incorporée, laquelle décroît en fonction des périodes radioactives concernées.
Les performances mesurées montrent que le verre mis en contact de l'eau en stockage profond ne perdrait que la moitié de sa masse en 10 000 ans.

• **Les déchets A**, de faible ou très faible activité, exempts de radioéléments à vie longue, sont concentrés dans des fûts d'acier (750 kg) ou dans des cylindres de béton (2,5 tonnes). Les déchets sont stockés en surface (La Hague a reçu un demi-million de m³. Le Centre de "Soulaines" dans l'Aube a pris le relais).

Au bout de 300 ans, ces déchets deviennent inoffensifs. Les structures de conditionnement, solides et résistantes, sont soigneusement contrôlées.


Figure 27 - (Réf. : EURODIF (Groupe Cogema)


Figure 28 - (Réf. : ANDRA - Films R. Leenhardt)

• **Les déchets B**, de moyenne activité, mais de vie longue pour plusieurs éléments (essentiellement les isotopes du césium et du strontium, dont les périodes sont respectivement de 25 et 35 ans, et, en très faible quantité, les actinides mineurs [(on appelle actinide un élément radioactif dont le numéro atomique est compris entre 89 (actinium) et 103 dont les périodes radioactives sont beaucoup plus longues (supérieures à 100 000 ans)]. Même ramenés aujourd'hui à 0,25 m^3 par tonne retraitée, puis vitrifiés et enfermés dans des conteneurs résistants, ces déchets ne peuvent être stockés définitivement en surface. Ces déchets constituent l'élément majeur de la Loi du 30 décembre 1991 sous la rubrique "Loi "Bataille" sur le stockage géologique".

L'expérimentation rigoureusement contrôlée - y compris en matière de choix des couches géologiques profondes - permet à la France d'acquérir une expertise reconnue. L'arrêt de Super-Phénix (Creys-Malville) prive cependant notre Pays d'un outil privilégié en vue de la transformation des déchets à vie longue en déchets à vie courte. Nous considérons cette décision comme scandaleuse.

La gestion des déchets radioactifs s'inscrit en France dans le cadre de la Loi N° 75-638 du 15 juillet 1975 (Article L.541 du code de l'environnement) et de ses décrets d'application : Les principes de base étant la prévention de la production des déchets, la responsabilité des producteurs de déchets jusqu'à leur élimination, la traçabilité des déchets et la nécessité d'informer le public.

L'arrêté du 31 décembre 1999 renforce et complète ces dispositions :

• Elaboration "d'études déchets" pour chaque site nucléaire

• Définition pour chaque type de déchets nucléaires des filières adaptées et dûment autorisées

• Mise en place des systèmes de suivi des déchets pour assurer leur traçabilité

Le tout sous le contrôle de l'Autorité de sûreté nucléaire.

Avancée des recherches par la gestion des déchets

Revue Générale Nucléaire mars-avril 2002 N°2 p.28 - Réf. Philippe Leconte CEA/DEN/DDIN :

• *"Conformément aux dispositions de la loi du 30 décembre 1991, dite "loi Bataille", les programmes de recherche sur les déchets nucléaires conduits par le CEA visent à réduire la quantité et la nocivité de ces déchets et à mettre au point les solutions optimales de conditionnement, d'entreposage et de stockage.*

• *Toutes les options proposées feront l'objet de démonstrations de faisabilité technique et d'évaluation de coûts.*

• *Grâce à la "séparation poussée", on cherche à extraire les actinides mineurs (neptunium, américium, curium) qui présentent au sein des combustibles usés, la radiotoxicité la plus élevée, après le plutonium. Débarassés du plutonium et des actinides, les déchets résiduels verraient leur radiotoxicité redescendre en quelques centaines d'années au niveau de la radiotoxicité de la masse de minerai d'uranium naturel dont ils sont issus. Les travaux conduits par les équipes du CEA pour mettre au point des procédés de séparation poussée débouchent aujourd'hui sur des résultats très positifs : taux de séparation supérieur à 99%. On entre dans la phase de faisabilité technique, menée de 2002 à 2005.*

• *Après séparation, les actinides mineurs pourraient être éliminés par transmutation. C'est théoriquement possible, mais de façon partielle, et avec des configurations de réacteurs et de parcs adaptés.*

• *Des travaux sont également conduits sur le conditionnement des déchets et leur comportement à long terme. Un résultat marquant concerne les colis de déchets vitrifiés : il montre que dans un stockage profond, 99,9% du verre serait toujours intact, même après 10 000 ans de contact avec l'eau. D'autres études montrent que certaines matières minérales ont une durabilité 100 fois supérieure à celle du verre.*

• *Pour la gestion des déchets ultimes, les chercheurs étudient l'entreposage de longue durée en surface ou subsurface et le stockage réversible en formation géologique profonde, en liaison avec l'ANDRA, pilote du programme sur le stockage profond.*

• *Toutes ces recherches, tendant à valider des modèles prédictifs sur des expériences extrapolables à l'échelle industrielle, devront aboutir à des solutions décidables en 2006".*

L'ANDRA (Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs) assure le suivi de la Loi de 1991 :

• *"A la fin de l'année 2005, l'ANDRA remettra son rapport sur la faisabilité du stockage des déchets à "Haute Activité" et à "Vie Longue" (HAVL) en formation géologique profonde".*

La radioactivité : une question de mesure

L'unité internationale de dose radioactive absorbée est le gray : 1 gray = 1 joule par kilogramme.

La dose équivalente tient compte de la nature des rayonnements et de leur efficacité biologique relative.

H (sievert) = D (grays) x F_q (facteur de qualité).

Le tableau suivant exprime en millisievert (mSv) le bilan des diverses expositions :

DOSES EQUIVALENTES EFFICACES ANNUELLES

Irradiation naturelle externe	Moyenne	Variation
Rayons cosmiques	0,36	0,1-0,2
Origine tellurique	0,41	0,2-1
Irradiation naturelle interne		
^{40}K	0,18	0,1-0,2
^{87}Ru	0,006	
Ra, Th, U	0,16	0,1-0,2
Radon	1,250	0,9-3
Autres	0,003	0,02-0,04
Total	**2,369 mSV/an**	
Irradiation artificielle		
Irradiation à des fins médicales	0,80	
Essais nucléaires (1960)	0,04	
Energie nucléaire	0,02	
Activité industrielle	0,08	
Totala	**0,94 mSv/an**	

Ce tableau montre que "le corps humain adulte" baigne, en moyenne, dans une radioactivité de 2,4 millisieverts par an (en dose absorbée). Ces unités deviennent souvent non compréhensibles pour les non-spécialistes.

Georges Charpak (Prix Nobel de Physique) et Richard L. Garwin, de l'Académie des Sciences des Etats-Unis, proposent une autre approche :

Pour l'essentiel, la radioactivité d'un homme de 70 kg, provient pour environ 6 000 désintégrations par seconde (6 000 becquerels) du potassium 40 qui imprègne tous les êtres vivants, et pour 4 000 becquerels, du carbone 14 de nos tissus corporels : soit un total de 10 000 becquerels.
Charpak et Garwin appellent "dari" l'irradiation annuelle d'un humain de 70 kilogrammes par le potassium et le carbone naturels contenus dans les tissus (dari : dose annuelle due aux radiations internes).

Le tableau en page suivante (de Charpak et Garwin) présente l'avantage de situer clairement les niveaux de risque. "Il faudrait raser les murs, en évitant les bordures de trottoir qui sont plus radioactives que le sol de la Hague".

Quelques sources d'irradiation répandues mesurées en dari	
1 dari	Irradiation annuelle d'un humain de 70 kilogrammes par le potassium et le carbone naturels contenus dans ses tissus
0,1 dari	Irradiation annuelle moyenne des Français due à l'industrie électronucléaire
5 daris	Le sol en Ile de France, dose annuelle
10 daris	Le sol en Bretagne, dose annuelle
5 daris	Rayonnement cosmique au niveau de la mer, dose annuelle. Accroissement de 1 dari pour 50 mètres de variation d'altitude
5 daris	Radiologie médicale, moyenne annuelle
40 daris	Un examen au scanner X
6 daris	Limite légale tolérée pour les effets de l'industrie nucléaire sur le public, dose annuelle
500 daris	Dose annuelle maximale, pendant cinq années consécutives, pour un travailleur de l'industrie nucléaire
30 000 daris	Dose mortelle, pour un individu
450 000 daris	Radiothérapie, irradiation local

(Réf. Georges Charpak. "Nuisances radioactives, Unités de mesure et Échéances électorales" in "La Revue des Deux Mondes" - Avril 2001)

2.2 - L'effet Tchernobyl et la Sûreté Nucléaire

Après avoir été marquée par l'entrée en matière terrifiante de l'énergie nucléaire, (6 et 9 août 1945), l'opinion internationale a été bouleversée par la catastrophe de **Tchernobyl**, le 26 avril 1986, à 1h24 du matin.

Des personnels administratifs et techniques non spécialistes du nucléaire ont voulu faire une expérience "afin d'améliorer le fonctionnement" des pompes qui permettent de refroidir le cœur du réacteur par circulation d'eau. Pour cela ils prévoyaient de faire fonctionner ce réacteur à eau bouillante et graphite ("aussi différent des réacteurs nucléaires occidentaux qu'un calculateur à boules l'est d'un ordinateur moderne". *[G. Charpak Loc.cit p.28]* à puissance réduite : **or ce réacteur devient très instable si on ne le fait pas fonctionner à puissance normale**.

De plus **on a commis la faute énorme de mettre hors service le système de protection d'urgence du cœur**. Enfin l'enceinte du réacteur ne ménageait qu'une faible détente alors que nos réacteurs bénéficient d'un vaste volume dans une enceinte très résistante, dite de confinement, qui comporte une paroi d'acier et de béton armé sur un mètre d'épaisseur.

La suite d'événements dans un réacteur qui avait par sa conception, toute une série de coefficients de réactivité, lesquels s'ils agissent simultanément se cumulent,... ne peut qu'aboutir à une explosion, suivie, le 26 avril 1986, par la projection de débris incandescents, des morceaux de combustible, du graphite en fusion. En quelques secondes la température a dépassé 2 000 degrés, d'où fusion et vaporisation du cœur, puis production d'hydrogène par décomposition de l'eau, d'où explosion avec rupture de l'enveloppe métallique du cœur, cependant que la poussière et les gaz radioactifs étaient projetés à grande altitude et donnaient naissance au nuage de contamination qui couvrit l'Europe Il n'y avait pas, dans la salle de commande, d'appareils de mesure de radioactivité.

Les premières victimes furent deux ouvriers tués par l'explosion, puis les vingt neuf pompiers par l'irradiation. *[Réf. "La Vérité sur Tchernobyl" de Mevdelev, cité par Louis Leprince-Ringuet dans "Noces de diamant avec l'atome" Ed. Flammarion. Mars 1991]*

...En France (Sud-Est) **la moyenne** de la dose n'a pas excédé une fois et demie le "bruit de fond" de nos régions granitiques (Bretagne, Massif Central).

Quant aux réacteurs nucléaires occidentaux, une enceinte de cette configuration a parfaitement résisté à Three Mile Island (événement nucléaire, sans perte humaine, et qui a commandé toute une série de progrès en matière de sécurité) là où l'enceinte soviétique a cédé à l'explosion d'hydrogène.

Face aux campagnes de désinformation, "il faut apprendre à maîtriser le nucléaire, à rendre transparente l'information qui le concerne, en sachant que la sottise humaine, conjuguée à la propagande, peut conduire à des catastrophes, comme le feu, si on en fait un mauvais usage". **Le risque zéro n'existe pas** (cf. Courrières où une explosion de grisou tua 1 200 mineurs en 1906, ou Malpasset dont la rupture du barrage provoqua la mort de 400 personnes...).

Les futurs réacteurs européens se proposent de renforcer la sécurité sur plusieurs plans.

3 - Cap sur le Réacteur Européen à Eau pressurisée ?

Fruit de la coopération franco-allemande ("Framatome - Siemens" aujourd'hui Areva-Siemens), **E.P.R.** (European Pressurized Reactor) **est un réacteur de la 3e génération** (La première génération correspond aux prototypes, la seconde génération est représentée par le parc nucléaire français, américain et japonais actuel. (REP - PWR etc...)

L'Italie a décidé de se joindre au programme E.P.R. La Finlande a passé commande.

E.P.R., annoncé pour la France, en tant que Réacteur de démonstration, représente trois avancées :

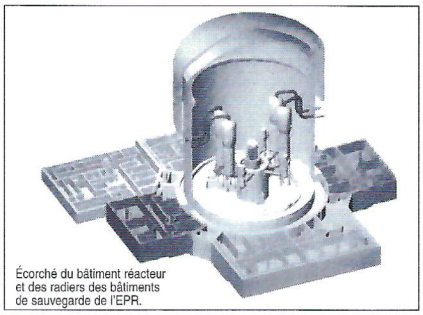

Écorché du bâtiment réacteur et des radiers des bâtiments de sauvegarde de l'EPR.

Figure 29
(Réf. Revue Générale Nucléaire Année 2003 N°3 mai-juin et N°4 juillet-août)

3.1 - Sécurité

Avec prévention des risques et limitation de leurs conséquences. La probabilité d'un accident grave avec fusion du cœur ("corium") passe de 10^{-5} par réacteur par an à 10^{-6} grâce à 4 systèmes indépendants et redondants de sûreté (injecteurs de sécurité, alimentation de secours des générateurs de vapeur, alimentation électrique de secours dont deux dans des bâtiments bunkérisés.)

Limitation de l'impact d'un accident sur l'environnement : Dispositifs de récupération et de refroidissement du corium. En cas de fusion du cœur, un canal d'écoulement achemine le magma du combustible vers un compartiment où il pourra se refroidir. **Réduction du risque hydrogène :** lors de la fusion du cœur, la gaine du combustible interagit à haute température avec l'eau. Il se forme alors de grandes quantités d'hydrogène qui au contact de l'oxygène de l'air, peut exploser. L'E.P.R. est équipé de recombineurs catalytiques qui réalisent cette réaction oxygène - hydrogène de façon contrôlée dans l'enceinte de confinement, elle-même constituée de deux parois de 1,30 mètre d'épaisseur. (Pour une production renforcée contre la chute des avions et les séismes de toute nature).

3.2 - Compétitivité

Cœur plus large, d'où puissance accrue, de 1 000 MWe à 1 600 MWe.

- Augmentation de la pression secondaire, pour porter le rendement thermodynamique de 34% à 36%

- Consommation de moins de combustible, production limitée de déchets, disponibilité de 92%, durée de vie accrue 60 ans.

3.3 - Meilleure utilisation du combustible :

7% de l'uranium. Moindre production de déchets (actinides) et taux élevé de combustion (65 GW/jour par tonne) donc une production plus élevée d'énergie.

Les études actuelles montrent la capacité accrue de l'E.P.R. à consommer du plutonium :

- d'une part, grâce à un cœur de plus grande taille (241 assemblages combustibles au lieu de 205 pour le cœur d'un réacteur N4 de même puissance thermique),

- d'autre part grâce à la possibilité d'utiliser à 100% du combustible "MOX" ; acronyme de mixte oxyde, qui mélange étroitement uranium et plutonium, le rendant ainsi totalement impropre à des fins militaires. D'où une **réduction de "l'inventaire du plutonium"**.

(Les travaux du CEA ont montré la capacité de l'E.P.R. à "multirecycler le plutonium en utilisant un combustible MOX-uranium légèrement enrichi".)

[Réf.: Revue générale Nucléaire R.G.N. - Année 2003 - N°4 - juillet-août p.14]

Le projet E.P.R. ne fait pas l'unanimité de la communauté scientifique dont une partie souhaiterait le passage direct, et contrôlé, à la quatrième génération.

4 - Quatrième génération

A l'initiative des Etats-Unis, un groupe de dix pays - dont la France - réunis dans "Forum Generation IV" , propose six concepts pour un déploiement à partir de 2030 : quatre réponses sur la technologie des Réacteurs à Neutrons Rapides (cf. "Phénix" et "Superphénix"), un sur celle du Réacteur à Très Haute Température, (non régénérateur au plutonium), le sixième sur le Réacteur à Sels fondus (RSF.) au thorium.

La France a exprimé un intérêt prioritaire :

• pour le Réacteur à très haute température (Very High Temperature Reactor Systems VHTR : 1 000°C à 1 200°C) refroidi à l'hélium, et dédié à la **production d'hydrogène où à la cogénération hydrogène/électricité**.

• pour le Réacteur à Neutrons Rapides, caloporteur hélium (Gas cooled Fast Reactor GFR)

• et pour le Réacteur à Sels Fondus (RSF).

Le réacteur à sels fondus au thorium

Dans le cadre d'un programme européen, le C.N.R.S., en collaboration avec E.D.F. prévoit la réalisation d'un "démonstrateur" du RSF au thorium dans les quinze années à venir. RSF étant un régénérateur (ou surgénérateur), rappelons le principe de la surgénération.

Surgénération : Nous savons que le seul élément fissile trouvé dans la nature est l'uranium 235 (sous l'absorption d'un neutron thermique). Mais l'absorption par l'uranium 238 produit un nouvel élément transuranien radioactif appelé Neptunium, suivant la réaction (n, γ)

$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U^{*} + \gamma \rightarrow ^{239}_{93}Np + ^{0}_{-1}e^{-} + \bar{\nu}_e$$

Après une période de 2,5 jours le Neptunium se désintègre à son tour par désintégration β^- en donnant un nouvel élément, le Plutonium 239. Soit :

$$^{239}_{93}Np \xrightarrow[2,3\,j]{} ^{239}_{94}Pu + ^{0}_{1}e^{-} + \bar{\nu}_e$$

Radioactif α, le plutonium 239 a une période de 24 000 années. **Et il est fissile.**

Trois réacteurs géants furent ainsi construits, refroidis à l'eau, sur le fleuve Columbia à Hanford, état de Washington, en 1943. Après quelques mois de "cuisson", des lingots intensément radioactifs d'uranium 238 furent retirés du réacteur, et le plutonium extrait : chaque réacteur pouvait produire 200 g par jour de plutonium à partir de l'uranium 238 "autrement sans valeur", on dit que l'uranium 238 est **fertile**.... Il en est de même du thorium 232, par la séquence résumée ainsi :

$$^{232}_{90}Th + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{233}_{90}Th^{*} + \gamma$$

$$^{233}_{90}Th^{*} \rightarrow ^{233}_{91}Pa + ^{0}_{-1}e^{-} + \bar{\nu}_e$$

où "Pa" est le protactinium puis, après une période de 27,4 jours :

$$^{233}_{91}Pa \rightarrow ^{233}_{92}U + ^{0}_{-1}e^{-} + \bar{\nu}_e$$

Le produit final, uranium 233 est radioactif avec une période de 160 000 années. Comme le plutonium 239 , il est fissile, tandis que son "surgénérateur", le thorium 232, est appelé fertile. Le thorium a des réserves minières supérieures à celles de l'uranium. En tant que combustible, il ne produit pas de plutonium.

Du point de vue de la puissance globale, l'absorption des neutrons par $^{238}_{U}$ ou $^{238}_{Th}$ ne constitue pas une perte. Le réacteur à uranium naturel par exemple, fondé sur le processus de fission de $^{235}_{U}$, produit en fait un surcroît de combustible à partir de $^{238}_{U}$

Il est donc possible de construire des réacteurs dans lesquels il y a plus de "combustible" produit, converti, que consommé. D'où le terme de surgénérations ou régénérations.

Revenons maintenant au **projet de Réacteur à sels fondus (RSF) régénérateur associé au cycle du thorium.**

Nous nous inspirons pour les pages qui suivent d'articles de Stéphanie Belaud du Journal du C.N.R.S. N° 162-163, juin-juillet 2003, et de C. Garzenne (EDF) et M. Delpech (CEA) "Les Réacteurs à sels fondus de génération IV" Dossier de la "Revue Générale Nucléaire" Année 2003. N°4 juillet-août p. 54-56

A la différence des autres projets du Forum Generation IV, un tel réacteur utilise un combustible liquide. Comme il circule, il fait office de "transporteur de chaleur" (caloporteur). Ce fluide (mélange de fluorures d'uranium 233 et de thorium 232), permet, sans qu'on ait besoin d'aller au cœur du réacteur, de récupérer tout au long du circuit, les produits de fission qui empoisonnent le réacteur.

La solution ? produire l'uranium 233 à partir d'un réacteur à eau pressurisée (REP) utilisant partiellement du thorium 232 au lieu de l'uranium. Ce mode de production est étudié à Orsay, tandis que la neutronique correspondante fait l'objet de la plate-forme Peren, au Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie LPSC. CNRS - IN2P9. Grenoble.

Plusieurs avantages sont attendus de cette filière RSF au thorium :

1 - La circulation d'un combustible liquide permet un retraitement en continu, "en ligne, ou quasi en ligne" : extraction des produits de fission, addition du combustible frais nécessaire.

2 - Les pertes neutroniques peuvent être minimisées, d'où l'intérêt du concept, qui s'avère optimal pour assurer la surgénération en cycle thorium (dont le bilan neutronique est très serré.)

3 - Le couplage au réacteur d'une unité de "multirecyclage" des actinides, (d'ailleurs produits en quantité moindre), évite le transport de matières très radioactives.

4 - Le fonctionnement en spectre de neutrons thermiques réduit l'inventaire fissile d'un facteur 10 par rapport aux RNR (neutrons rapides) : d'où précisément une diminution de la production d'actinides mineurs et une minimisation du flux de combustible en retraitement.

Un tel mode de fonctionnement apparaît donc comme "sobre et propre" : soit une consommation de 100 kg de thorium par TWhe, pour quelques grammes de plutonium et actinides mineurs envoyés aux déchets ultimes.

5 - Les sels fondus ont des caractéristiques intéressantes pour l'incinération des déchets à vie longue.
Il n'est plus nécessaire - contrairement aux systèmes à combustibles solides d'extraire les actinides pour fabriquer du combustible neuf (d'où une absence de manipulations de certains isotopes, tels que $^{244}_{Cm}$: le curium 244)

L'argument 5 (incinération des déchets) étant retenu comme prioritaire par le document final de Génération IV.

Conclusions : Les Réacteurs à Sels fondus au thorium présentent un ensemble de caractéristiques intéressantes pour la sûreté, la non-prolifération et l'économie. Plusieurs questions relevant de la Recherche et Développement ne manqueront pas de surgir lors de la phase de réalisation du démonstrateur EDF/CNRS :

La seule expérience significative a été réalisée entre 1965 et 1969 au Laboratoire National d'Oak Ridge (ORNL). La partie réacteur a fonctionné correctement, atteignant une puissance de 8 MWth. Mais le retour d'expérience est assez limité, en vue du passage à la faisabilité industrielle :

- Contrôle en ligne de la chimie du sel combustible
- Corrosion
- Comportement du graphite sous irradiation
- Performance de l'extraction en ligne des produits de fission non solubles
- Conception de l'unité de retraitement en ligne
- Réduction de la production de tritium, piégeage
- Approche de la sûreté par un cœur à "combustible circulant"
- Fiabilité de systèmes en contact avec un milieu radioactif
- Techniques de maintenance
- Bilan économique global "Réacteur - Retraitement"

Tous ces problèmes ont été identifiés par les promoteurs du projet Grenoble - Orsay - CNRS - E.D.F.
Ils constituent autant de raisons en faveur d'une recherche académique approfondie unissant les groupes de physique des réacteurs du LPSC (Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble), l'IPN d'Orsay (Institut de Physique Nucléaire) et le département de chimie sur les réacteurs du futur.

Le Multiplicateur d'Energie : Un système hybride

Proposé par Carlo Rubbia, Prix Nobel de Physique, le multiplicateur d'énergie couple un réacteur nucléaire à neutrons rapides en régime sous-critique ($k < 1$) avec un accélérateur de particules.

Le combustible utilisé serait, comme dans le paragraphe précédent, le thorium 233. Ce dernier, fissile produit des neutrons rapides mais en nombre insuffisant pour entretenir la réaction en chaîne. D'où le projet d'utiliser un accélérateur de protons dont la collision avec une cible de plomb située au cœur du réacteur, fournit les neutrons supplémentaires à l'obtention de la réaction en chaîne.

Ce projet séduisant est à l'étude. Il répond à deux préoccupations :

- Pas de production d'éléments radioactifs à vie longue
- Pas de risque de "fusion du cœur"

l'arrêt de l'accélérateur entraînant l'extinction de la réaction en chaîne en quelques secondes.

"on s'est rendu compte qu'on pourrait également l'utiliser à d'autres fins que la production d'électricité : du point de vue des neutrons rapides, tous les noyaux sont équivalents. Au lieu de brûler du thorium dans des conditions propres, on pourrait donc alimenter cette machine avec des déchets de réacteurs ordinaires. Mais le principe demeure : développer un accélérateur qui soit capable de produire de l'énergie dans des conditions acceptables" (C. Rubbia - 1997)

"Bien que très séduisants, ces systèmes hybrides doivent encore être étudiés pour en arriver à une solution efficace, rentable, et parfaitement sûre" (René Turlay - 1997)

Utilisation des réacteurs nucléaires au dessalement de l'eau de mer :

Sans décision radicale, à l'horizon 2020-2030 les deux tiers environ de la population mondiale souffriront d'une pénurie modérée ou aiguë en eau pour irrigation.

Le dessalement de l'eau de mer (et à moindre échelle, celui des eaux saumâtres) est une solution attrayante et économique. D'où la contribution possible à un développement durable des pays concernés, pour plusieurs raisons :

- Les réserves d'eau de mer disponibles sont immenses,
- Le coût de dessalement bénéficie d'une chute notable,
- Le dessalement apporte une solution à des besoins variés : usages domestiques et industriels, usages agricoles, traitement des eaux.

Ces remarques expliquent que le marché du dessalement se trouve actuellement en pleine croissance (taux annuel d'environ 7%)

Nous considérons deux procédés de dessalement : la distillation à effets multiples (MED) et osmose inverse (RO). Le tableau suivant représente les puissances électriques MED disponibles et le taux d'eau dessalée obtenue en m³ par jour. Notation REP signifie "Réacteur à Eau Pressurisée". L'efficacité des réacteurs nucléaires est comparable à celle du charbon, pollution de gaz à effet de serre et de pluies acides en moins.

"Le schéma suivant correspond au premier projet de dessalement nucléaire à vocation vraiment internationale (EURODESAL) qui a démarré en février 2001 dans le cadre du 5e plan de la Commission Européenne. Partenaires : CEA. - ENSALDO (Italie) -EMPRESARIOS AGRUPADOS (Espagne) - CANDESAL (Canada) - AREVA (France) - IRRADIARE (Portugal) et l'Université de Rome (Italie). Le CEA est coordinateur du projet."(Figure 31).

L'innovation essentielle de EURODESAL réside dans le développement de schémas de couplage utilisant la chaleur d'un réacteur nucléaire normalement perdue à la source froide.

Puissance électrique nette disponible avec un couplage MED conventionnel

		Eau dessalée produite (m3/j)		Puissance consommée (Mwe)		Puissance nette disponible (Mwe)	
Sources	**MWe**	**MED**	**RO**	**MED**	**RO**	**MED**	**RO**
REP	619	530 000	546 000	91* + 42* = 133	108	486	511
	928	795 000	808 000	136* + 61* = 197	160	731	768
Charbon	617	530 000	546 000	103* + 37* = 140	108	477	509
	925	795 000	808 000	154* + 54* = 208	160	717	765

** Puissance utilisée pour des services auxiliaires*

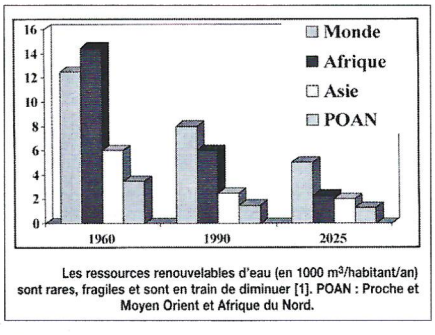


Figure 30 - (Réf. Simon Nisan, Linda Volpi, CEA, DEN/DDIN/DER/SERI, CEN Cadarache dans Revue Générale Nucléaire année 2001 N°6, décembre page 44)

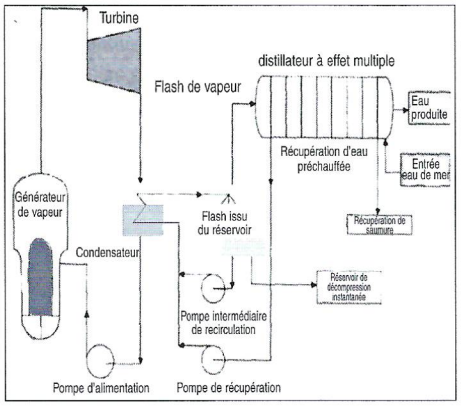


Figure 31 - Shéma de couplage d'un REP et MED

Piste 7
La Biomasse

Biomasse

La "Biomasse" est la masse totale des êtres vivants subsistant en équilibre sur une surface donnée du globe terrestre.

La quantité totale de matière organique produite par des organismes vivants d'une aire particulière pendant une période donnée est appelée "Productivité" :

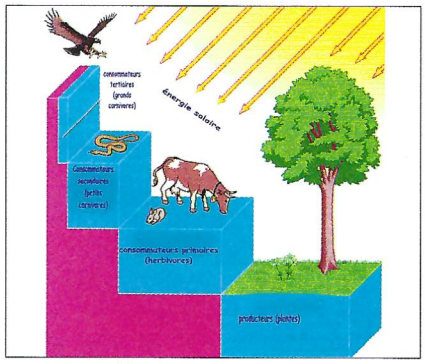


Figure 33 - "Voies de consommations" Encyclopedia Britannica - Vol. 14/2-114)

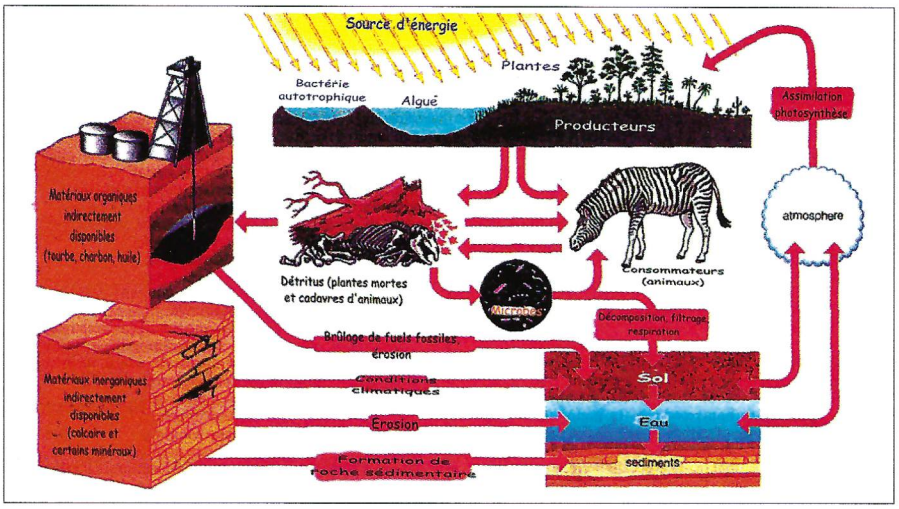


Figure 32 - Voies générales de flux d'énergie dans la biosphère (Référence : Encyclopedia Britannica - Vol. 14/2-113)

Sur le plan de l'exploitation énergétique qui nous intéresse, la biomasse est plus restreinte que cette définition : Elle ne concerne que les végétaux qui se développent par photosynthèse (assimilation chlorophyllienne).

Dans le processus photosynthétique, une fraction (1 à 2%) de l'énergie solaire qui atteint la Terre est absorbée par la chlorophylle des plantes : l'autre partie du rayonnement (98 à 99%) est réfléchie par les feuilles et les autres surfaces ou absorbée par les autres molécules et convertie en chaleur. La vitesse de photosynthèse dépend de l'éclairage, de la température de l'environnement et de la disponibilité de l'eau et des autres nutriments : azote, phosphore…

Dans l'assimilation chlorophyllienne, tout se passe "comme si" le dioxyde de carbone, qui représente 0,03% de l'atmosphère, se transformait dans la réaction en hydrate de carbone avec libération d'oxygène, suivant la réaction globale :

$$6\ CO_2 + 6\ H_2O + h\nu \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

Cette réaction de photosynthèse présente un double avantage :

- permettre la nutrition, donc la vie des plantes,

- remplacer par de l'oxygène près des trois quarts du dioxyde de carbone atmosphérique

La mesure de la vitesse à laquelle les organismes convertissent l'énergie lumineuse (ou toute forme d'energie chimique inorganique dite autotrope) en énergie chimique des structures organiques est appelée "productivité primaire". Cette productivité est souvent mesurée en "accroissement de biomasse".

Celle d'une forêt tropicale ou d'un estuaire est de 1 800 grammes par m^2 par an. Celle d'une terre cultivée, dans la même unité, vaut en moyenne 650, celle d'un lit d'algues : 2 000 grammes par m^2 par an, celle de broussailles désertiques : 70 grammes par m^2 par an

En terme de productivité totale, les océans participent pour 16.10^{10} tonnes de carbone par an, la surface terrestre environ 8 fois moins. La somme des végétaux chlorophylliens, planctons etc…, est estimée à 230 gigatonnes par an en matière sèche.

Quant au potentiel énergétique exploitable il s'agit d'un immense réservoir : il est de l'ordre de 1 000 Mtep pour les pays industrialisés et de 1 300 Mtep pour les pays en voie de développement.

[On rappelle que 1 Mtep = 1,6 TWh]

Le potentiel de la biomasse est renouvelable et ne dépend absolument pas des combustibles fossiles.

Deux groupes de filières exploitent ou peuvent exploiter. le potentiel de la biomasse :

1 - Les filières thermochimiques s'inspirent de techniques traditionnelles :

La combustion du bois est exploitée depuis des époques qui coïncident avec la découverte du feu par l'espèce humaine. Deux milliards de personnes ne connaissent pas aujourd'hui d'autre forme d'énergie, le plus souvent dans des conditions très polluantes et de faibles rendements ; même si de nombreux foyers traditionnels caractéristiques des cultures et des ethnies, représentent des solutions économiques et même écologiques.

De toute façon la combustion des bois, des déchets… dégage vapeur d'eau et dioxyde de carbone (lequel s'ajoute au CO_2 d'effet de serre).

(Voir plus loin "La filière bois-énergie").

La carbonisation ou pyrolyse (cf. le charbon de bois, utilisé 3 000 années avant J.C. et le coke de l'ancienne sidérurgie).

La gazéification utilisée dans les gazogènes à bois de la II^{ème} Guerre Mondiale.

2 - Les filières biochimiques exploitent les fermentations microbiologiques ; tout d'abord :

La fermentation méthanique : responsable du gaz des marais, du grisou des mines de charbon..

Les biomasses concernées comme "puits d'énergie" comprennent les matières organiques des fumiers, des lisiers. Avec quels rendements ? - Cinq kilogrammes de matière organique sèche peuvent produire 1 Nm^3 de biogaz. (1 Nm^3 : 1 m^3 dans des conditions normales), soit 0,7 kg de méthane CH_4.

La transformation des tissus et déchets agro-alimentaires, qui polluent nappes phréatiques et rivières, est devenue une priorité urgente. Un projet existe en Bretagne (Usine CUMA Mené Energie), visant l'élimination de 70 000 tonnes de biodéchets : La méthanisation couvrira 80% de l'énergie thermique nécessaire au séchage du lisier et des déchets et effluents retraités, jusqu'à en extraire les 5% de matière organique qu'ils contiennent : ces 5% s'avèrent être un véritable "or vert", 100% naturel, très recherché en agriculture biologique.

L'usine du Mené contribuera à la réduction des excédents structurels d'azote, et donc à l'amélioration de la qualité de l'eau de la région.

[Réf. IDEX. N° 16 . novembre 2002]

La fermentation alcoolique (par l'action des levures) : les biocarburants

La fermentation alcoolique (par l'action des levures) : les biocarburants

En présence de levures :

$C_6 H_{12} O_6$ (glucose) → 2 $C_2 H_5 OH$ (éthanol) + 2 CO_2

Une mole de glucose (180 grammes) fournit 2 moles d'éthanol (92 grammes). Pour une réaction complète 51% de la masse de glucose se trouve ainsi transformée en éthanol (cf. bières, vins, cidres...).

Cette même réaction peut être appliquée à la fermentation de déchets végétaux ; **les biocarburants** sont des combustibles à base d'éthanol issus des produits de l'agriculture tels que : la betterave, les céréales ou la pomme de terre. La quantité de dioxyde de carbone que produit leur combustion est identique à celle absorbée par les plantes.

Un hectare de blé peut produire 2 500 litres d'éthanol ; un hectare de betterave en donne 6 500 litres. A partir de l'éthanol, on peut fabriquer l'ester méthyl- tertio-butylique, lequel peut être mélangé à l'essence jusqu'à 15% en volume.
[Un hectare de colza produit 1 300 litres d'ester].

L'utilisation de l'éthanol comme carburant n'est pas nouvelle. Au Brésil, par exemple, une grande partie du parc automobile fonctionne avec de l'éthanol extrait de la canne à sucre.

La technologie d'extraction de l'éthanol est bien maîtrisée. Quelles améliorations peut-on apporter ? - Les levures qui le produisent meurent au-delà d'un certain taux d'alcool. Des équipes du CNRS cherchent à les rendre plus résistantes et plus productives. Pour cela, ils étudient leur métabolisme et l'expression de leurs gènes. Les chercheurs essaient également de minimiser la production de sous-produits toxiques pour les levures, tels que le glycérol.

Les travaux ont permis d'obtenir des souches qui fabriquent de l'alcool à 20% en 50 heures.

"Nous nous plaçons dans l'optique d'une concurrence très dure avec le pétrole. Notre obsession est donc de trouver de nouveaux biocarburants - avec des levures plus performantes - et de faire baisser le coût de ceux qui existent déjà".

Le laboratoire des Sciences appliquées de Toulouse vise "le passage du laboratoire à la production industrielle".
[Réf. Gérard Goma : goma@insa-tise.fr et Sébastien Esculin "Journal du CNRS" N° 160-161 Avril/Mai 2003. p.22]

Avantages et inconvénients :

Si les biocarburants ont une influence positive : moindre émanation d'oxydes de soufre et de carbone, ils présentent le désavantage d'une augmentation des émissions d'oxydes d'azote (en raison de leur niveau d'oxygénation par rapport au pétrole). L'impact écologique doit être examiné avec soin, de même que les coûts : collecte, transport et stockage de la biomasse.

Les déchets ménagers : les résidus de végétaux et d'animaux (os, gras de viandes... épluchures) auxquels s'ajoutent les emballages (papiers, cartons, plastiques) posent un problème important : il rejoint celui des lisiers et des déchets industriels ou hospitaliers.

Un Français produit en moyenne 360 kilogrammes de déchets ménagers par an (1 kg par jour). La solution la plus classique consiste en l'incinération des déchets ; la combustion propre de tout ce qui peut brûler impose :

- Le tri magnétique des objets métalliques
- L'incinération du polychlorure de vinyle (PVC), dont la combustion produit des vapeurs d'acide chlorhydrique
- La même exigence vaut pour les composés soufrés SO_2 et H_2S : les usines s'imposent donc un traitement des émanations qui ne laisse passer qu'une "fumée blanche". Il reste alors la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone.

Le rendement global est médiocre, mais la réduction des déchets justifie l'opération.

Dans la région Ile-de-France, trois usines : Issy, Ivry, Saint-Ouen, dans le cadre du T.I.R.U. filiale E.D.F. (Traitement Industriel des Résidus Urbains)... assurent une production d'électricité équivalente à 0,5% de la production nationale, suffisante pour alimenter 250 000 personnes (à partir de six cent mille tonnes d'ordure).

La séquence ? Elle est très classique, celle d'une centre thermique :

Incinération → Vapeur d'eau chaude → Turbine → Alternateur (+ Condenseur)

Une tonne d'ordure permet ainsi de produire 1 500 kW thermiques (utilisables en chauffage urbain), mais seulement 300 à 400 kWh électriques (théorème de Carnot).

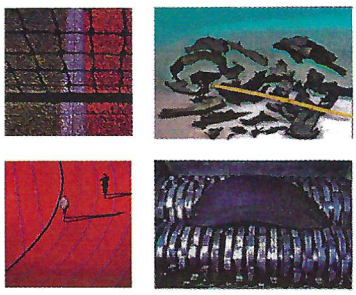
Cas des déchets industriels spéciaux, ou déchets organiques. Ils sont brûlés dans des incinérateurs à haute température (à plus de 1 000°C) ou utilisés comme combustibles en remplacement du pétrole (ex. : dans les cimenteries).

L'actuelle contribution énergétique de la "Biomasse" est de 0,5%. **Certaines prévisions d'énergie alternative assignent un objectif de 8% en 2010.**
["The Energy Crunch". Thomas Sancton. Time. 18 septembre 2000]

Exemple des pneumatiques :

[Réf. Pierre Philibert - Conférence Ethique et Sciences - I.T.A. Avril 2001] (Documentation : Manufacture Française de Pneumatiques Michelin)

Pneu et environnement

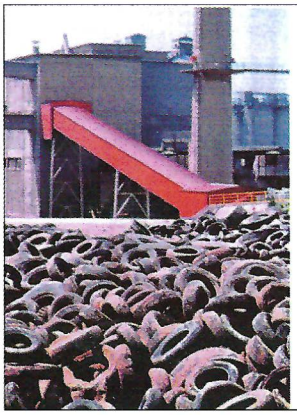


- Valorisation des déchets
- Valorisation énergétique / combustible
- 1 tonne pneu / 0,7 tonne de pétrole ; incinérateurs/cimenteries

Valorisation matière :
cryobroyage → poudrette

Revêtements de route/terrains de sports...

Figure 34



Valorisation énergétique
- Récupération de 40% du contenu énergétique total
- Pouvoir calorifique : 30 à 34 MJ/kg → 0,7 à 0,8 Tep/tonne de pneus (1 pneu 195/65 R15 - 8,5 l. essence)

Deux voies
- Combustible pour centrales thermiques. Incinérateurs spécialement conçus (Japon, U.S.A....)
- Combustible de substitution pour cimenteries. Pneus entiers ou coupés introduits dans le four avec le "Clinker"
- Température > 1 400°C - Atmosphère oxydante.
- Constituants inorganiques font partie du ciment.

Figure 35

Valorisation des Pneus Usagés non Récupérables (P.U.N.R.)

Près d'un milliard de pneus arrivent chaque année en fin de vie. Le pneu n'est pas biodégradable. Les matières premières ne sont pas recyclables. Possibilités :

1 - carcasses brutes : amortisseur de vibrations mécaniques et acoustiques (talus de route, murs anti bruits...)

2 - mise en granulés, poudrette par broyage, déchiquetage et tri mécanique.

Broyage cryogénique donne poudrette très fine (< 50µ)

Utilisés en manufacturés (roues...), sols synthétiques (aires de jeux, pistes sportives...), revêtements routiers (liant bitume-caoutchouc).

La filière bois - Energie (B-E)

La France dispose de la première forêt d'Europe Occidentale et le bois-énergie est sa principale ressource énergétique d'origine renouvelable après l'hydraulique.

La production annuelle en bois-énergie, 9,5 Mtep, est supérieure aux productions nationales de charbon, gaz et pétrole réunies (7,5 Mtep).

Au-delà de sa contribution à la sécurité de nos approvisionnements (5% du bilan énergétique national) le bois-énergie (B-E) n'engendre pas d'émissions **nettes (globales) de gaz à effet de serre tant que la surface boisée est stable** ou en croissance. Il participe à la création d'activité locale et à l'aménagement du territoire (on estime, en France, à 25 000 emplois les effectifs de la filière).

Principe de fonctionnement

1 - Centrales thermiques classiques alimentées en bois, pour produire de l'électricité et de la chaleur en cogénération.

2 - Chaudières individuelles ou industrielles avec bois "déchiqueté" ou granulés ou plaquettes (dans ces deux derniers cas alimentés automatiquement), pour le chauffage.

Réserves (au niveau exploitation) : **la moitié seulement des déchets de la filière bois** sont actuellement valorisés.

La filière bois-énergie a fait l'objet depuis 1994 de programmes de soutien associant l'Etat, l'ADEME (Agence pour le **D**éveloppement **E**t la **M**aîtrise de l'**E**nergie), et un petit nombre de Régions. Ce sont les programmes intitulés "Plans Bois-Energie et Développement local".

Ils concernent d'abord les Industries du Bois :

- Elimination des déchets

- Equipement permettant un fonctionnement respectueux de l'environnement.

- Et pour les entreprises amélioration de leur bilan énergétique en produisant par cogénération chaleur et électricité (chaudières avec turbines)

- Aides aux petites entreprises (menuiserie, tabletterie, tournerie).

Le meilleur bilan environnemental et énergétique est obtenu lorsque les déchets-bois sont consommés sur place.

Quant aux modes d'utilisations externes de la filière bois-énergie, ils sont différentiés suivant les destinataires

1 - Collectivités locales (gros projets structurants)

2 - Chauffage collectif (d'immeubles) : les maîtres d'ouvrage sont plus libres et tirent la filière B.E. vers l'avant (avec bois granulé ou bois déchiqueté), accueil touristique en milieu rural.

3 - Chauffage individuel (en "perte de vitesse") malgré l'attrait de la bûche.

Spécificité française : Les ouragans de décembre 1999 ont mis à bas 3 années de consommation en B-E (145 millions de m³). Problème : coûts d'exploitation / coûts de chauffage.

Puissances, Disponibilité, Rendement

Chaudières industrielles de 2 MW

Disponibilité : ≅ 100 %

Rendement : 35 % en fonctionnement classique

Chauffage domestique : 90 % des consommations énergétiques de tous types de bois. **Une chaudière bois de 400 kW représente 1 emploi.**

Objectifs énergétiques :

Production conjointe 25 MW th / 10 MWe

Références bibliographiques :

- "L'Energie" André Delalande. Ed. PYC Livres 1998 p.154-160

- Encyclopedia Britannica Vol. 14 p. 1130-1209 Vol. 2 p. 225

- "Les Energies" Dossier Energies Renouvelables in "Vouloir Savoir" Fédération des Associations du Conservatoire National des Arts et Métiers. Avril 2002 p. 47-49

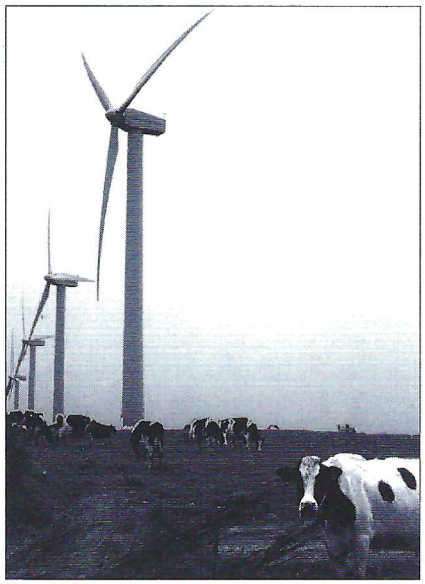


Figure 36 - "Eoliennes performantes et silencieuses" de Plouarzel" (29). Cliché : M. Th. Miossec

Piste 8

L'énergie éolienne

L'idée de fabriquer de l'électricité à partir de l'énergie cinétique du vent est due à Lord Kelvin (1802). Mais seule l'invention de la dynamo par l'électricien belge Zenobe Gramme (1850) va donner naissance au principe des éoliennes modernes.

Les machines éoliennes, de puissance et donc de dimensions très variables, se présentent sous la forme d'une tour métallique ou "colonne" de 30 à 100 mètres de hauteur, sur laquelle est fixé "**L'Aérogénérateur**" proprement dit, un alternateur en général entraîné par une hélice de 2 ou 3 pales, de 5 à 90 mètres de diamètre. Un gouvernail permet de les orienter automatiquement dans le sens du vent. La vitesse optimum du vent est de l'ordre de 7 à 10 mètres par seconde entre 25 et 35 km/h.

La vitesse du vent, à une hauteur de pylône de 90 mètres, peut être de 25 à 35% supérieure par rapport à la valeur qu'elle prend à une hauteur de 10 mètres. La loi de Betz donne alors une puissance double : d'où l'intérêt des aérogénérateurs fonctionnant à grande hauteur.

Cependant, à partir d'une vitesse de l'ordre de 25 m/s, soit 90 km/h, on doit arrêter le fonctionnement de l'éolienne sous peine d'endommagement des structures. Ces dernières doivent être calculées et réalisées en fonction de la possibilité de vents violents, voire d'ouragans.

Loi des Eoliennes

"La Loi des Eoliennes" a été formulée pour la première fois en 1919 par le physicien allemand Albert Betz, dont les travaux publiés en 1926 sous le titre "Wind-Energie" (Energie Eolienne) demeurent une référence fondamentale en matière d'éoliennes et d'aérogénérateurs.

La Loi de Betz est naturellement une loi "d'aérodynamique". L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, donc fonction de la masse et de la vitesse d'un certain volume d'air :

$$\text{soit } E_c = \frac{1}{2}\,mV^2$$

Les 2 termes **V** et **m** doivent être précisés :

1 - Hypothèse sur V = <v> : La vitesse du vent traversant la surface S balayée par le rotor s'exprime part <v> = $(v_1 + v_2)/2$ où :

v_1 désigne la vitesse moyenne du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne.

v_2 désigne la vitesse moyenne du vent après passage à travers le plan du rotor.

2 - Masse d'air traversant la surface S balayée par le rotor en une seconde :

$m = \rho S <v> = S (v_1 + v_2)/2$ où :

ρ désigne la masse volumique de l'air, nous prendrons $\rho = 1{,}225 kg.m^{-3}$

3 - Puissance extraite du vent par le rotor :

$$P = \frac{1}{2}\,m\,(v_1^2 - v_2^2) \qquad \text{Soit } P = \rho.\frac{1}{4}\,(v_1^2 - v_2^2)\,(v_1 + v_2)S$$

4 - Puissance totale du flux d'air non perturbé traversant S sans rotor

$$P_o = \frac{1}{2}mv_1 = \frac{1}{4}\rho S(v_1 + v_2).(v_1^2)$$

Mais dans ce cas $v_2 = v_1$

D'où $P_o = (\rho/2).v_1^3.S$

Enfin le rapport Puissance extraite/Po s'exprime par :

$$Y = P/Po = \frac{1}{2}\left[1 - (v_2/v_1)^2\right]\left[1 + v_2/v_1\right]$$

Posons $x = v_2/v_1$ $\qquad y' = -3x^2 - 2x + 1$

$y' = 0$ solution positive : $x = \frac{1}{3}$;

Elle correspond au maximum de $P/P_0 = Y$

$y_{Max} = 16/27 \cong 0{,}59$

La puissance maximale extraite du vent par le rotor représente les 16/27, soit 59% de la puissance totale contenue dans le vent.

5 - Formule de Betz Soit r le rayon des pales

$S = \pi r^2$

$V = (v_1 + v_2)/2$ représente la distance parcourue en une seconde par le rotor.

Le volume d'air traversé pendant cette seconde vaut $\pi\, r^2\, V$, ce qui correspond à une masse $m = \pi\rho\, r^2 V$,

D'où la puissance (énergie cinétique par **seconde**) $P_a = \frac{1}{2}\pi\rho\, r^2\, V^3$

C'est la puissance absolue de l'éolienne

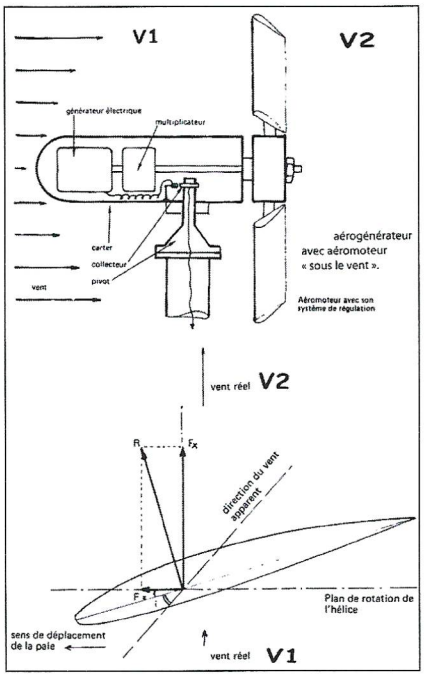
Numériquement, avec $\rho = 1{,}225\ kg.\ m^3$ $\qquad$ **$P_a = 1{,}924\ r^2\ V^3$**

Si nous prétendions extraire toute l'énergie contenue dans le vent, l'air continuerait son chemin à vitesse nulle ; Il n'arriverait donc pas à abandonner le rotor : Aucune énergie ne serait "extraite". La vitesse du vent n'est pas nulle à la sortie. En réalité, l'égalité $v_1/v_2 = 1/3$ (freinage du vent à un tiers de sa valeur originale) correspond à une éolienne idéale transformant en énergie mécanique les 16/27 (59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent, soit une puissance maximale dite puissance de Betz :

$$P_{Betz} \equiv P_{Max} = (16/9) \times 1{,}924\ r^2\ V^3$$

$$P_{Max} = 1{,}140.\ r^2\ V^3$$

(ou encore P_{Max} / mètre carré = $0{,}363V^3$) $\qquad$ **C'est la limite de Betz.**



Figures 37 et 38
Réf. Eoliennes et aérogénérateurs
guide de l'énergie éolienne - Guy Cunty. Edisud

La puissance mécanique fournie par l'éolienne est proportionnelle au carré des dimensions du rotor et au cube de la vitesse du vent. Cette puissance peut être utilisée directement (pompage) ou transformée (électricité…)

Le coefficient numérique doit tenir compte des différents rendements :

Hélice : de 0,20 à 0,85

Multiplicateur ou réducteur : de 0,7 à 0,98

Alternateur, ou génératrice continue : de 0,80 à 0,98

Transformateur : de 0,85 à 0,98

Redresseur : de 0,9 à 0,98

Batteries d'accumulateurs (aux fins de garantir la fourniture d'énergie avec un minimum de discontinuité) : de 0,7 à 0,8

Pertes en lignes : de 0,9 à 0,99

• Pour les "aérogénérateurs industriels" classiques, les rendements se situent entre 30 et 50% de la limite de Betz, soit pour la vitesse nominale,

$$0{,}34r^2V^3 < P_{pratique} < 0{,}57\ r^2V^3$$

• Dans le cas d'aérogénérateurs de puissance supérieure ou égale à 0,1 MW, les rendements sont optimisés à chaque étage grâce à des réalisations très soignées. On atteint alors 70% de la limite de Betz, soit $P \approx 0{,}8.r^2V^3$, sans que ce niveau de performance semble pouvoir être dépassé *[Réf. Guy Cunty "Eoliennes et Aérogénérateurs" Edisud, Aix en Provence 2001]*

Précisions sur la vitesse

• La vitesse du vent dépend de l'altitude h

Une loi simple donne cette variation , pour les vitesses horizontales :

$$V_1/V_2 = (h_1/h_2)^{\alpha}$$

L'exposant α, caractéristique de la nature du terrain varie de 0,08 à 0,12, en terrain plat, jusqu'au domaine de 0,25 à 0,4 en terrain très accidenté. *"D'où l'intérêt de sites peu ou pas accidentés, pour lesquels la variation de la vitesse avec l'altitude est faible : La vitesse du vent, vue par les parties hautes et basses des hélices, a pratiquement la même valeur. Il en résulte une réduction des contraintes sur les pales, ce qui sera d'autant plus essentiel si le diamètre de l'hélice est élevé"*
[Guy Cunty. Loc.cit p. 38]

• *La force exercée par un vent de vitesse constante arrivant sur une surface se décompose en une* ***poussée*** *P, perpendiculaire à la direction du vent et une* ***traînée*** *T, dans la même direction que le vent. Pour de faibles incidences i (par exemple i < 15% d'arc) P croît plus vite que T et crée le couple moteur qui fait tourner l'hélice à la vitesse du vent. Bien évidemment, le vent vu par la pale est la composition du vent réel et du vent créé par le déplacement de la pale. Ce vent est appelé "apparent" ou "relatif". Pour rendre maximal le rapport "Poussée/Traînée" on prendra en compte l'existence, pour chaque portion de pale, d'un angle d'incidence optimal. L'amélioration du rendement de l'hélice conduit ainsi à faire varier le "calage" de chaque portion de pale, c'est-à-dire de faire "****viller****" la pale. [Réf. G. Cunty. Loc.cit]*

Structures d'un aérogénérateur

• L'hélice à deux ou trois pales forme l'aéromoteur, lequel est pourvu d'un système de régulations (multiplicateur ou réducteur) commandant une fréquence de rotation stable de l'hélice à partir d'une certaine "vitesse-seuil" du vent. Un dispositif de sécurité commande l'arrêt de la machine en cas de tempête.

• L'hélice entraîne par couplage direct, ou via un multiplicateur, le générateur électrique muni de tous ses éléments, (dynamo ou alternateur, transformateur, redresseur, accumulateur).

• Un pivot d'orientation et un gouvernail, pour que l'hélice se présente face au vent quelle que soit la direction de ce dernier (le choix des éoliennes à axe horizontal, dont les hélices sont "au vent", est le cas le plus fréquent).

• L'aérogénérateur est supporté par une colonne, ou par un pylone.

[Une entreprise française (Compagnie Internationale de Turbine Atmosphérique, CITA) a réalisé en Antarctique (Institut Paul-Emile Victor) un prototype capable de résister à des vents de plus de 320 km/heure, à des températures extrêmes : c'est le CH CAPHORN 10/PoL, dont une réplique a été installée à Chicago, au bord du Lac Michigan.]

Evolution

Le marché mondial de l'éolienne effectue, depuis les années 1980, une progression importante dans les pays largement consommateurs d'énergies fossiles, et donc producteurs de gaz à effet de serre qu'ils souhaitent limiter. dans leur parc énergétique : Etats-Unis (Californie), Allemagne, Danemark, et plus récemment Espagne. Ces quatre pays représentent à eux seuls plus de 75% de la puissance mondiale installée : plus de 18GW en juillet 2001.

En France, le niveau de puissance d'origine hydraulique installée par le Groupe E.D.F. en 2002, soit 19,4% de la puissance totale, joint aux performances de production du parc électronucléaire et à sa délivrance d'un kWh économique - le tout sans émission de gaz à effet de serre, n'ont pas stimulé le développement de la filière éolienne : 40 MW en 2000, contre 4 500 MW en Allemagne, 1 800 pour le Danemark, 1 500 en Espagne, alors que la France possède le deuxième "gisement" européen, derrière la Grande Bretagne, premier gisement européen, mais qui accuse le même retard que la France : 20 MW en 1999.

Le programme EOLE 2005 lancé en 1996 par le gouvernement français a pour but de favoriser l'émergence de cette filière dans notre pays. Le nouveau programme affiche le projet d'installation de 5 000 MW d'éoliennes à l'horizon 2010, dont un appel d'offre de 500 MW offshore pour la fin de l'année 2003. ...Tandis que la Grande-Bretagne lance un programme toujours offshore, pour un ensemble de fermes éoliennes de puissance unitaire 1,5 MW, qui serait en mesure, en 2010, d'assurer l'électricité domestique pour 1 foyer sur 6 ! et que la firme TOTAL projette, à titre expérimental au large de Dunkerque, un ensemble de 5 éoliennes de puissance totale 12 MW visant une population de 15 000 personnes : elles sont montées sur des mâts de 80 à 95 mètres, et sont dotées de 3 pales d'au moins 40 mètres : *"Plusieurs études d'impact (respect du paysage, des oiseaux, limitation des nuisances sonores) et de sécurité ont été menées avant la construction. Total se portera candidat pour les appels d'offre que le gouvernement français va lancer dans l'éolien sur terre et sur mer".*

Quant à la réalisation des aérogénérateurs, E.D.F. gère 3 500 éoliennes dans le monde.

"Avec l'acquisition d'ENXCO, l'un des leaders du secteur aux Etats-Unis (213 MW dont 178 MW aux U.S.A.), SIIF Energies (50 % E.D.F.) est devenu un acteur majeur du marché mondial de l'éolien : SIIF détient 3 MW éolien en Grande-Bretagne, 12 MW en France, 3MW en Allemagne, 0,7 MW en Suède".

En France, où le Groupe vise 20 à 30% du marché de l'éolien en 2005, l'unité de "Petit François" (2,2 MW) à la Guadeloupe a démarré en 2002 ; les travaux ont commencé en Vendée (20 MW). 30 à 50 MW devraient être mis en service en 2003.
Au Maroc, le parc de Tétouan (50 MW) le plus important d'Afrique, a produit 190 GWh en 2002" [Réf. : "Rapport Annuel 2002 Groupe E.D.F." - Courtoisie Patrick Bihoues. E.D.F. ; Directeur de Cabinet, Délégation Régionale Auvergne]

Le tableau suivant (M. Aliréza Laali - E.D.F. - mission Energies Renouvelables) extrait de la Revue "Vouloir Savoir", Fédération des Associations du Conservatoire National des Arts et Métiers No. 1.2002 p. 70, indique la répartition des sites éoliens, avec leur puissance installée, répertoriés en avril 2002.

Nom	Puissance MW	Nom	Puissance MW
Widehem (Pas de Calais)	4,5	Saint-Pierre (Saint-Pierre et Miquelon)	1,8
Lastours (Aude)	3,05	Morne-Malgré-Tout (Martinique)	0,9
Donzère (Drome)	3	Morne-Carrière (Martinique)	0,9
Petit Canal (Guadeloupe)	2,4	Lanrivoaré (Finistère)	2,64
Le Portel (Pas de Calais)	3	Plourin (Finistère)	3,3
La Hague (Manche)	4,5	Edern (Finistère)	6,5
Plouarzel (Finistère)	3	Plougras (Côtes d'Armor)	6
Goulien (Finistère)	6	Fécamp (Seine Maritime)	7,5
Le Meredou (Aveyron)	7,2	Cotentin II (Manche)	3
Lodévois-Larzac (Hérault)	5,4	La Rochelle (Charente Maritime)	1,5
Le Souleilla Treilles (Aude)	7,5	Breedt (offshore) (Pas de Calais)	7,5
Escales Conilhac (Aude)	7,5	Montjoyer (Drôme)	20,25
Sigean (Aude)	6,6	La Montagne Ardéchoise (Ardèche)	18
Lavatoggio (Haute Corse)	3	Fontanelles (Merdelou2) (Aveyron)	7,8
Centuri (Haute-Corse)	2,4	Avignonais-Lauragais (Haute Garonne)	7,5
Sotta (Corse du Sud)	2,4	Grande Garrigue (Aude)	15,84
La Désirade (Guadeloupe)	2,4	Pic Aubeill (Pyrénées Orientales)	15,84
Morne Constant (Capesterre de Marie-Galante)	1,5	Roquetaillade (Aude)	5,28
Petite Place (Caressée de Marie-Galante)	1,5	Haut Cabardès (Aude)	21
Miquelon (Saint-Pierre et Miquelon)	0,6	Corbières (Pyrénées Orientales)	12,5
Ventilègne-Bonifacio (Corse du Sud)	2,4	Opoul-Perillos (Pyrénées Orientales)	10,25
Cap Cavallo-Calvi (Haute Corse)	2,5	Puech Agut (Hérault)	9,9
Torricella (Haute Corse)	7,8	Lirac (Gard)	10,5
Rogliano (Haute Corse)	4,2	Ploumoguer (Finistère)	6
Vallée Forta-Bonifacio (Corse du Sud)	7,5	Guilmaec (Finistère)	10,5
Mamarinu-Bonifacio (Corse du Sud)	7,26	Larzac (Aveyron)	9,9
Corpu-di-Verga-Bonifacio (Corse du Sud)	6,6		
U-vengonu-Bonifacio (Corse du Sud)	5,94		

Conclusion :
des obstacles aux perspectives

• L'impact visuel et acoustique est parfois contesté par les riverains. Mais la France dispose de sites importants en zones peu sensibles.

• Un niveau trop élevé de rupture de disponibilités énergétiques peut freiner le développement des éoliennes

• "Emprise" :
Dans le cas d'une Unité d'Habitation Urbaine type (250000 habitants), exemple Clermont-Ferrand, l'emprise au sol serait de 7 000 hectares pour 350 éoliennes de 1,5 MW et une disponibilité énergétique de 3000 heures dans l'année (35%). Seulement 2% - 140 hectares au maximum - de cet espace est physiquement occupé par les éoliennes. Le reste pouvant être cultivé (Installation terrestre).
Pour une unité d'habitation rurale type : bourg de 1 000 habitants, sans grande unité industrielle (exemple Rochefort-Montagne) il faudrait, dans les mêmes conditions, deux éoliennes de 700 kW, et 1 hectare d'emprise au sol.
[Réf. Supplément au Bulletin de la SFP/134 Mai 2002]

• Le bruit des aérogénérateurs, autrefois très critiqué, a été réduit : "les machines modernes" sont plus silencieuses, à quelques dizaines de mètres, le vent produit souvent plus de bruit que les éoliennes. Nous l'avons vérifié dans le site des Corbières (12,5 MW) et à Plouarzel.

• Nous avons vu que les éoliennes face au vent nécessitent un "système de guidage". Quelques constructeurs proposent des machines sous le vent (à axe vertical). Une vitesse de rotation plus faible (quelques tours par minute) impose la présence d'un multiplicateur pour atteindre les 1 500 tr/min nécessaires à l'obtention d'une fréquence de 50 Hz. L 'emploi de la vitesse variable, associée à une électronique de puissance donne à ces éoliennes un niveau de "production surfacique", en kWh par m², plus élevé.

Quelques autres perspectives :

• La préparation d'aérogénérateurs à vitesse variable de puissance supérieure à 2 MW (de 3 à 5 MW fin 2003).

• Le développement des grands aérogénérateurs ne doit pas faire oublier l'intérêt des éoliennes domestiques : quelques kW pour les sites isolés (non raccordés) ou quelques centaines de watts pour les applications de loisir : bateau, caravanes.

• Eléments favorables pour la France :

"Le prix du kWh est en baisse régulière : Il a été divisé par 7 en 15 ans. Dans les DOM-TOM et en Corse, où la production d'électricité est plus coûteuse qu'en Métropole, l'électricité éolienne est une alternative intéressante" (M.Aliréza Laali. Loc.cit p. 70).

Le potentiel offshore de la France est estimé à plusieurs Gigawatts.

• Le développement des aérogénérateurs est porteur d'innovations technologiques :

- Pales en carbone, au profil variable, suivant la source du vent ("Air Marine")

- "Corps en qualité" aéronautique

- Pilotage automatique géré par logiciel en fonction des conditions météo *(Exemple "CITA")*

- Carène optimisée de l'anneau qui entoure les pales pour réduire le niveau sonore et améliorer la protection "avifaune".

Conclusion : Au niveau mondial : 0,2 % de la consommation électrique est assurée par les "fermes éoliennes". Au lieu de 0,01% pour la France. La prévision mondiale est estimée à 2,8% en 2010. Même si la France doit consentir un effort considérable, on ne saurait sous-estimer l'effort de notre Pays en terme de qualité, de performances et de lutte contre la pollution.

Principales Références bibliographiques utilisées (Piste VIII)

- *"Eoliennes et Aérogénérateurs" : Guy Cunty - Edisud 2001*
- *"La Loi de Betz" : Bernard Ledru - Université de Mons (Belgique)* http ://ramses.umh.ac.be/wantelet/energie/ENERg60.htm
- *"L'Energie" : Christian Ngô - Dunod 2002 p. 45*
- *"Les Energies" in "Vouloir savoir" - Revue de la Fédération des Associations du Conservatoire National des Arts et Métiers. CNAM. Avril 2002 p. 65-70*
- *Rapport annuel du Groupe E.D.F., 2002*

Piste 9

Le solaire thermique Le solaire photovoltaïque

1 - Le solaire thermique

Le chauffage solaire thermique est connu depuis toujours. C'est ainsi qu'en 1878, à l'Exposition Universelle de Paris, Augustin Mouchot présentait une machine à vapeur alimentée par la chaleur du soleil et entraînant une rotative d'imprimerie... tandis qu'en 1948, le CNRS construisait à Mont-Louis (Pyrénées-Orientales) un four solaire de 75 kW où les rayons du soleil tombaient sur un grand miroir parabolique au foyer duquel était placé le four de traitement... Devant les résultats encourageants, un four de 1 000 kW fut installé à Font-Romeu. Grâce aux 9 000 facettes de miroirs recueillant l'énergie thermique solaire, une température de 3 800°C a pu y être atteinte.

Au total, dans le monde, les capteurs thermiques solaires permettent de produire et de substituer **près d'une mégatonne équivalent pétrole**. Non loin de Los-Angeles, dans le désert Mojave, neuf centrales solaires "thermodynamiques" apportent au réseau électrique de la Southern California Edison une capacité de 354 MW.

Les ambitions affichées pour la France sont très modestes : moins de 70 000 m² de capteurs solaires par an en 2006, au lieu de 1 000 000 m² par an en Allemagne en 2002, puis 2 500 000 m² (Scénario "Solar na kler").

2 - Le solaire photovoltaïque

2.1 - Cellules photovoltaïques. Historique et Développement

Le développement de la technologie des cellules solaires est issu du travail du physicien français Antoine-César Becquerel, grand-père d'Henri Becquerel, premier "découvreur" de la radioactivité naturelle. En 1839, Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque en expérimentant sur une électrode solide placée dans une solution électrolytique. Il observe que la tension augmente lorsque la lumière tombe sur l'électrode.

Cinquante ans plus tard, Charles Fritts construit la première véritable cellule solaire en utilisant les "jonctions" formées par le revêtement, au moyen d'une feuille d'or ultra fine, presque transparente, d'un échantillon de sélénium (dont on vérifiera plus tard les propriétés semi-conductrices). Le dispositif de Fritts transforme moins d'un pour cent de l'énergie lumineuse absorbée en énergie électrique. Bien que tout à fait inefficace au regard des standards actuels, ces premières cellules solaires engendrent déjà l'image d'une énergie abondante, et propre.

En 1891, R. Appleyard évoque "la vision bénie du soleil, qui non seulement déverse à travers l'espace, gratuitement, ses torrents d'énergie,... mais par la voie des cellules photoélectriques, ces torrents se retrouvent dans des usines électriques, au point d'éteindre totalement les machines à vapeur, et de supprimer toute fumée !."

Vers 1927, une autre cellule solaire, jonction "métal - semi-conducteur", dans ce cas "cuivre-oxyde de cuivre semi conducteur" est mise en démonstration.

A partir de 1930, aussi bien les cellules au sélénium que les cellules à l'oxyde de cuivre sont utilisées en photométrie et en photographie. Cependant, leurs coefficients de conversion énergétiques demeu-

rent inférieurs à 1%. Cette impasse est finalement surmontée grâce à la cellule solaire au silicium développée par Russel Ohl en 1941.

Trente ans plus tard, trois chercheurs américains, G.L. Pearson, Dary Chapin et Calvin Fuller, ont réalisé une cellule solaire au silicium dont le coefficient de conversion d'énergie (lumineuse - électrique) atteint 6%. Dans les années 1980, les techniques de fabrication des cellules au silicium, ou à base d'arséniure de gallium, font monter l'efficacité à 20%. Enfin, en 1989, une cellule solaire à concentrateur, dispositif qui focalise la lumière solaire sur la surface sensible grâce à des lentilles, est parvenue à une efficacité de 37%. Plus généralement, des cellules solaires couvrant de larges domaines d'efficacité, et de prix de revient, sont maintenant utilisables.

Il est important de noter, qu'à l'inverse des systèmes à base de batteries électrochimiques, ou de fuel, les cellules solaires n'utilisent aucune réaction chimique pour produire de l'énergie électrique. Contrairement aux générateurs électriques classiques, elles n'ont pas de pièces mobiles.

Le satellite artificiel Vanguard I, lancé par les U.S.A. le 17 mars 1958, était le premier à être équipé d'une cellule photovoltaïque pour alimenter ses émetteurs radio : ces signaux durèrent des années, puisqu'il n'existait pas d'interrupteur d'arrêt.

Les cellules solaires peuvent être organisées en réseaux de plusieurs milliers d'unités et fonctionner alors comme centrales électriques, de la même manière qu'une centrale thermique ou une centrale nucléaire. Des configurations plus petites forment les "panneaux solaires" exploités en distribution locale, y compris par des usagers résidentiels.

Lorsqu'on éclaire la jonction P-N, les photons solaires peuvent être absorbés, les électrons passent (par absorption photoélectrique des quantas de lumière) de la bande de valence à la bande de conduction. D'où création de paires électrons-trous (le trou correspond à la place du réseau laissée libre par le départ de l'électron). Ces paires se déplacent ensuite sous l'action de la différence de potentiel V_N - V_P. On réalise ainsi une photopile capable de convertir directement l'énergie d'un rayonnement électromagnétique en énergie électrique.

Pour les photopiles au silicium, les photons incidents doivent avoir une énergie supérieure à la largeur de la bande dite interdite (DE = 1,12 eV), soit une longueur d'onde inférieure à 1,1 micromètre. Ces photopiles fonctionnent donc quand elles reçoivent de la lumière visible.

Les photopiles exigent que le silicium ait un degré de pureté très poussé (99,999%) d'où un prix de revient très élevé. Cependant, depuis 1958, le développement considérable du silicium pur dans les composants électroniques a progressivement permis de le produire sur une plus grande échelle. Le prix ne représente plus que 1/250ème du prix d'origine.

Unité : Le Watt-crête (Wc) définit "la puissance normalisée d'un module photovoltaïque dans les conditions d'éclairement énergétique solaire de 1 000 Watt.m^{-2}" [Puissance moyenne reçue, en situation de ciel clair, par une surface de 1m² orientée perpendiculairement aux rayons du soleil].

Dans un climat bien ensoleillé, à la latitude de 45°, l'énergie utilisable annuelle a été estimée à 1 800 kilowattheures par m². Pour un rendement de 15%, on obtiendrait alors 270 kWh/m² (électriques). Une centrale nucléaire classique de 1 gigawatt produit annuellement une énergie de 7 TWh. Les exigences en surface d'une centrale solaire équivalente à la centrale nucléaire précédente seraient donc de 26 km².
La surface d'un grand département du Midi permettrait de faire face, moyennant la solution des problèmes technologiques et économiques, aux besoins électriques de la France.
Pour la seule année 2000, la production a dépassé 220 Mégawatts-crête, pour un chiffre d'affaire mondial de un milliard de dollars.
(Voir panneaux photovoltaïques - Fig. 41)

2.2 - Applications - Perspectives :

En France, une petite centrale électrique solaire expérimentale de 2,5 mégawatts, dénommée THEMIS, avait été construite par E.D.F. dans les années 1970 aux Pyrénées-Orientales. Elle était couplée au réseau électrique. Mais il a été décidé de l'arrêter en 1986 en raison du coût excessif du kilowattheure (comparé au tarif industriel).

Deux raisons ont été données :

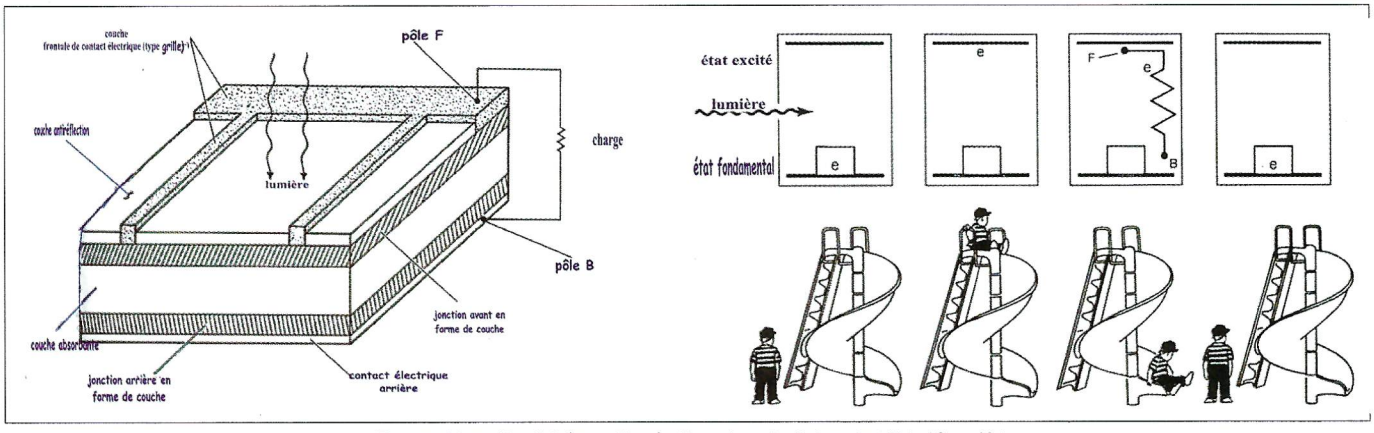
- le courant "photovoltaïque" est continu. Il ne peut donc pas être envoyé directement dans les transformateurs reliés au réseau où circule du courant alternatif. Il est donc nécessaire de le transformer d'abord en courant, sinon alternatif, du moins ondulé, au moyen de dispositifs spéciaux qui, à l'époque, n'avaient pas un bon rendement ;

- les panneaux solaires se recouvraient vite de poussières, perdant ainsi leur efficacité, d'où une nécessité de nettoyages fréquents, et onéreux.

La puissance maximale d'une pile photovoltaïque dépend évidemment de la puissance qu'elle reçoit du rayonnement solaire.
En Californie, où l'ensoleillement est important, des installations d'une vingtaine de mégawatts-crête ont été réalisées. Elles semblent donner des résultats satisfaisants, mais avec des prix de revient encore assez élevés.

Un consortium formé de AMACO Corp's SOLAREX et ENRON. CORP. annonçait en 1996 un plan de production massive de panneaux photovoltaïques, en vue du développement, au Nevada, dans un centre militaire, d'unités de 100 MW.

Perspectives : Les satellites et les observatoires spatiaux fondent l'essentiel de leur alimentation électrique sur l'utilisation de panneaux photovoltaïques. La figure suivante *[Réf. Kenneth Brecher "Science and the Future". Encyclopedia Britannica. 1995 Year Book. P.54]* représente les éléments de **l'Observatoire Compton**, destiné à la détection de rayons gamma dont les domaines d'énergie sont précisés en bas de cliché.



Figures 39 et 40 - Schémas d'après Encyclopedia Britannica Vol. 18 p. 401

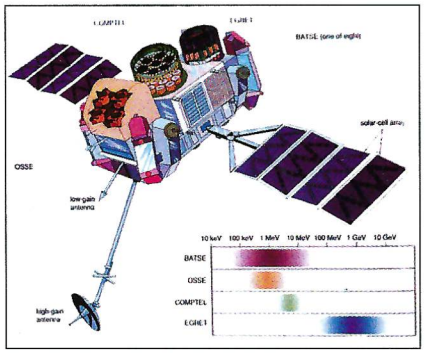


Figure 41

Pour une centrale solaire photovoltaïque de 1 GW, produisant donc 7 TWh par an, la puissance crête nécessaire serait de l'ordre de 4 GW-crête (1 kW-crête fournit environ 2 000 kWh par an, pour 7 m² de capteur. - (*Réf. H. Nifenecker - SFP - Loc. cit.)* Actuellement, il semble qu'on puisse viser un coût de 3,81 € par Watt-crête, soit 548,82 € par m². D'où un coût d'investissement pour la centrale de 15,24 G€.

Toutefois, pour une production à très grande échelle, en utilisant la technologie des multicouches, on pourrait, dans quelques dizaines d'années, envisager de descendre à des prix de l'ordre de 152,45 € par m² (incluant le génie civil, les convertisseurs de courant, etc...).

D'où l'évaluation "prospective", pour une centrale de 1 GW, d'un coût d'investissement de 4,57 G€ (au lieu de 1,22 G€ pour une centrale nucléaire de même puissance).

Cependant, le coût de fonctionnement nettement plus élevé d'une centrale nucléaire (retraitement du combustible notamment) rendrait, dans une perspective d'un fonctionnement de 20 ans, les coûts totaux (investissement + fonctionnement) comparables.

"On pourrait alors, moyennant une politique volontariste en recherche et développement, imaginer dans le demi-siècle à venir, une compétitivité du solaire photovoltaïque" [H. Nifenecker - Loc.cit].

Dans les pays en développement, les installations photovoltaïques, déjà présentes, sont appelées à se développer pour deux raisons :

- ensoleillement privilégié

- non connexion, jusqu'au milieu du XXIème Siècle, de un ou deux milliards de personnes au réseau électrique.

D'où l'intérêt de petites installations. Une puissance moyenne de 2 à 3 kW-crête est estimée nécessaire (éclairage, fonctionnement du réfrigérateur) pour l'alimentation d'une famille. Il s'agit alors d'électricité photovoltaïque décentralisée, important dans les pays en voie de développement à fort ensoleillement.

Il faudrait ajouter, dans les pays industrialisés, la présence, depuis 1975-1980, de maisons solaires, maisons individuelles dont les toitures en pente ou les façades sont équipées de modules photovoltaïques. L'emploi d'un onduleur en fait un courant comparable à celui du réseau. Des dispositifs et des compteurs spéciaux ont été mis au point pour que les personnes habitant ces maisons puissent consommer le courant du réseau la nuit ou quand le soleil ne brille pas ou celui de leur propre production quand le soleil brille.

Le journal du CNRS de juillet-août 2002 publiait un projet dit "Succès", qui propose de reporter sur des substrats économiques (une céramique peu coûteuse) de très fines couches de silicium monocristallin de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur. Ce projet, animé par le professeur André Langio du Laboratoire de Physique de la Matière de Lyon, en collaboration avec un autre Laboratoire (GEMPPM) et l'industriel PHOTOWATT a mis au point la "Mullite", céramique composée de silice et d'alumine, véritable couche active de la future cellule photovoltaïque.

En laboratoire, les coûts de production sont estimés autour de 1,7 €/Watt-crête au lieu de 3,8 €/Watt-crête pour les filtres classiques, avec des rendements compris entre 15 et 20%.

2.3 - Evolutions françaises et mondiales

Depuis la brusque interruption de la politique de soutien aux énergies renouvelables (1986), la position officielle de la France a été de manière constante de réserver le photovoltaïque aux applications professionnelles "hors réseau" : balises routières, maritimes ou aéroportuaires, relais télécoms, horodateurs... en raison de l'absence pratique de contraintes et frais de fonctionnement.

La puissance totale relative à l'électrification de sites isolés (habitats, refuges) s'élèverait à 8 MWc pour l'ensemble du territoire national, dont une très grande partie dans les Départements d'Outre Mer *(cf. "Loi Pons" de défiscalisation du secteur).*

Pour le seul territoire métropolitain, le photovoltaïque bénéficie depuis 1995 de l'ouverture du FACE (Fonds d'Amortissement des Charges d'électrification) et de l'accord de E.D.F. - ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) à l'option "énergie renouvelable" dès lors que l'investissement est considéré comme compétitif avec l'extension et le renforcement du réseau de distribution Basse Tension... Mais, sur les 1 000 sites recensés, seuls quelques dizaines étaient réalisés fin 1999.

Désormais ce sont les applications raccordées qui présentent le plus grand intérêt en termes de potentiel de développement à court et moyen terme. La tendance mondiale va dans ce sens : Programmes U.S.A., Japon, Allemagne, Espagne, Italie, Suisse, Pays-Bas. Le Japon prévoit 5 GWh en 2010. La filière photovoltaïque est très dynamique : elle a atteint son âge industriel et commercial, après huit années de croissance à un taux moyen annuel de 20% ; la production cumulée des modules photovoltaïques à usage terrestre a dépassé le Gigawatt-crête en 1999... pour un rythme de progression comparable à celui de la microinformatique (avec laquelle le photovoltaïque partage en particulier le matériau de base).

Une piste prometteuse : la coordination des programmes publics "bâtiments / photovoltaïque" où ce dernier bénéficie d'une image très favorable : "la citoyenneté énergétique".

Enfin la Recherche et Développement est une composante essentielle de cette filière "émergente" dans trois domaines :

- Les matériaux photovoltaïques
- Les composants électroniques, dont les onduleurs de connexion
- L'intégration des modules photovoltaïques dans les couvertures, façades.

Intérêt des Centrales Photovoltaïques :

Risques sanitaires nuls,

Risque de pollution chimique au niveau de la fabrication (silicium) ; pollution visuelle éventuelle.

Contrainte d'occupation des sols : une Unité pour Habitation Rurale de 1 000 habitants : 2 hectares

une Unité pour Habitation Urbaine de 150 000 habitants : 700 hectares

[Réf. Supplément au Bulletin de la SFP / 134 Mai 2002]

Prévisions mondiales 2010 :

0,1% (au lieu de 0,03% actuellement dont 0% en France)

Mais n'oublions pas la possibilité de "ruptures", de "discontinuités technologiques".

Références :

1 - "Basic photovoltaïc Principles and Methods" par Kenneth Zweibel et Paul Hersch (1984)

2 - Encyclopedia Britannica "Energy Conversion" vol. 18 1998 p. 400-402

3 - "La photovoltaïque" in "Vouloir Savoir " CNAM. Loc.cit p.41-43

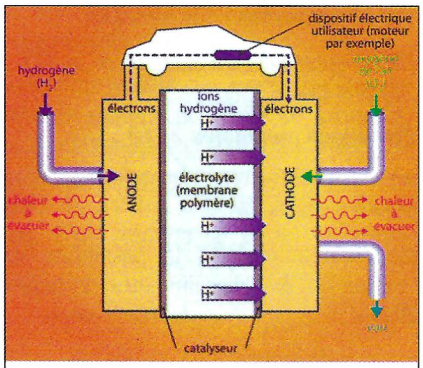
Piste 10

Des piles à combustible à la voiture à hydrogène ?

"Une nouvelle énergie de 160 ans...". Le principe de la pile à combustible a été mis en évidence par Sir Humphrey Davy en 1802 : Dans les piles ou accumulateurs classiques, les matières actives sont stockées aux électrodes, ou à la rigueur dans l'electrolyte, mais sont contenues dans le générateur.

Dans la pile à combustible, les matières actives sont amenées en continu aux électrodes.

Trente-sept ans après Davy, l'electrochimiste Sir William Grove parvient à la réalisation expérimentale d'une pile utilisant de l'hydrogène, de l'oxygène, et comme électrolyte de l'acide phosphorique dilué. Nous sommes en 1839 (il semble que dès l'été 1838, Christian Friedrich Schönbein, professeur à l'Université de Bâle, ait devancé William Grove : dans une lettre à Michaël Faraday, il relate des expériences au cours desquelles un electrolyte a produit un courant électrique sans que les électrodes ne se soient transformées chimiquement comme c'est le cas dans des piles ordinaires). Ami de Schönbein, William Grove décrit l'effet, en février 1839, comme "Electrolyse inverse" et en reconnaît la portée comme "moyen de production d'énergie électrique".



La pile à combustible

En suivant la célèbre formule $H_2 + 1/2\ O_2 \rightarrow H_2O$, elle produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur lorsque hydrogène et oxygène sont mis en présence de façon contrôlée.

Figure 42 - Exemple de pile à combustible (Réf. Journal du C.N.R.S N° 160-161. Avril-mai 2003 p. 24)

1- Principe

Réaction aux électrodes :

A l'électrode négative de la pile :

$$H_2 \underset{\leftarrow}{\overset{\rightarrow}{}} 2H^+ + 2e^-$$

A l'électrode positive de la pile :

$$O_2 + 4e^- + 4H^+ \underset{\leftarrow}{\overset{\rightarrow}{}} 2H_2O$$

Globalement

$$2H_2 + O_2 \underset{\leftarrow}{\overset{\rightarrow}{}} 2H_2O$$

Force électromotrice de cette pile (à courant nul et à 25°C) : 1,23 volt.

Cette pile demeure une curiosité de laboratoire pendant plus d'un siècle, malgré les perfectionnements apportés au fil des années : catalyseurs au noir de platine donnant aux réactions des vitesses acceptables, matrice poreuse en plâtre contenant l'électrolyte (qui transporte vers la cathode les ions H+). A partir des années 1960, l'une des grandes réalisations pratiques des piles à combustible (dont le cœur est formé d'un empilement de cellules électrochimiques élémentaires : chaque cellule comportant anode, electrolyte et cathode... et catalyseurs)... réside dans leur utilisation par la NASA en vue de l'alimentation électrique des programmes GEMINI, APOLLO, SHUTTLE (dans ces derniers cas il s'agissait de cellules alcalines, avec électrodes Carbone/Nickel fonctionnant à des températures inférieures à 100°C).

Intérêt théorique

• La réaction globale précédente est plus énergétique que celle du charbon et du pétrole.

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + (5{,}02\ eV)$$

au lieu de

$$C + O_2 \rightarrow CO_2\ (+4{,}08\ eV)$$

• La réaction de base n'est ni toxique, ni polluante

2. Problèmes

L'alimentation en hydrogène : l'hydrogène est un vecteur, non une source ; il faut d'abord le produire, le stocker, l'embarquer en sécurité (Peu de matériaux sont parfaitement étanches à l'hydrogène sous pression) ; s'y ajoutent des risques de corrosion.

2.1 - Réalisation d'électrodes à gaz

Il faut obtenir des "électrodes à gaz" permettant à celui-ci de migrer jusqu' aux sites électrochimiquement actifs sans que l'électrolyte ne les noie et ne fuie au travers de l'électrode.

2.3 - Le choix des catalyseurs en fonction des conditions de fonctionnement à basse température, seuls les catalyseurs à base de métaux de transition nobles, rares et coûteux sont utilisables en milieux acides. On peut les éviter en milieu basique, mais l'electrolyte se carbonise à partir du CO_2 de l'air.

2.3 - Piles à haute température : la catalyse est simplifiée, mais il faut mettre la pile à température avant son utilisation, car elle se refroidit à l'arrêt, malgré un calorifugeage efficace, mais volumineux et lourd.

3. Réalisations pratiques

3.1 - Les Piles à acide phosphorique : cet acide est fort peu coûteux. Il est utilisé à des températures assez élevées (200°C). Il ne résiste pas à des chocs violents.

Cette filière dite "PAFC" (Phosphoric Acid Fuel Cell) est la plus développée sur le plan technologique. Les performances obtenues sont de l'ordre de 100 à 300 milliwatts par cm². Ce type de pile, d'utilisation stationnaire, est exploité au Japon par Mitsubishi Electric Corporation (MELCO) qui a réalisé des piles de 200 kW à Osaka.... Il faut citer également Kansaï Electric Power Co, Tokyo-Bay (5 MW) Goî (10 MW), et aux Etats-Unis, des sites de 200 kW (Intl. Fuel Cells Corps).

Depuis le début de 1999, E.D.F.-G.D.F. fait fonctionner une pile de 200 kWe alimentée au gaz naturel et reliée au réseau E.D.F. à Chelles (Seine-et-Marne). Cependant le prix du kilowatt est de l'ordre de 2 500 à 5 000 dollars U.S., et la plus optimiste des prévisions ne semble pas pouvoir descendre au-desous de 1 500 à 2 000 $: les électrodes des cellules électrochimiques sont en graphite - d'où le coût - et l'acide phosphorique à 200°C pose des problèmes de structure : joints, pompes, ...

Fonctionnement de la pile ONSI.PC25-C / Chelles

[Réf. Philippe Mathevon - E.D.F. - Pôle Industrie et Bernard Courtaudon - E.D.F. - G.D.F. Services - Auvergne Sciences N° 51. Décembre 2001 p. 23-26]

Cette pile à acide phosphorique (PAFC) utilise le gaz naturel (essentiellement le méthane CH_4, "reformé" et donc transformé en Hydrogène H_2 et monoxyde de carbone CO) :

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3\ H_2$$

(Réaction de vapo-reformage)

Le CO réagit avec l'eau :

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

(Réaction dite de shift)

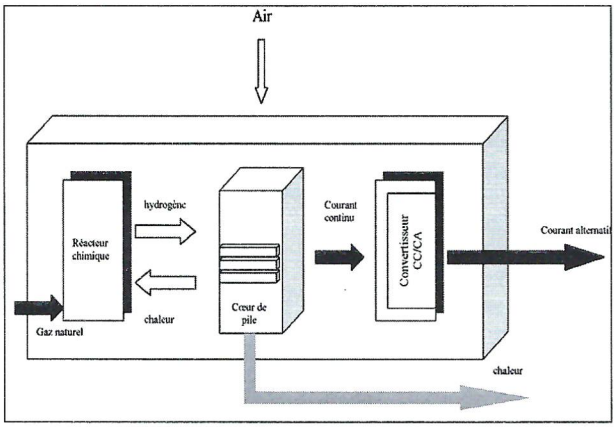


Figure 43 - Schéma H. Berthelier (d'après document G.D.F.)

Le fonctionnement du cœur de la pile a été décrit plus haut.

La pile de Chelles est une pile PC25 modèle C fabriquée par la compagnie américaine ONSI, joint-venture créé par United Technology Corporation + Toshiba.

PC25-C fonctionne en cogénération : 200 kW électrique + 200 kW thermique.

L'ensemble des piles ONSI avait cumulé en 2001 plus de 2,7 millions d'heures de fonctionnement. Deux piles installées au Japon ont fonctionné 9500 heures sans arrêt.

A puissance nominale, la consommation de gaz est d'environ 50m³/h.

Le rendement électrique de la pile est de 40% PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur) et ce sur une large gamme de puissances.

Il y avait en 2002 20 piles ONSI en Europe, plus de 200 dans le Monde.

Dans le secteur de la cogénération, avec production simultanée de chaleur et d'électricité, Gaz de France a adopté une démarche très active, dans la perspective d'une fourniture aux particuliers et au tertiaire.

Des Piles à combustible de 3,5 à 4 kW fonctionnent au gaz naturel et sont destinées à des bâtiments publics (En association avec Hpower américain). Elles sont installées à Dunkerque (novembre 2002), Nancy (février 2003), Dunkerque, Sophia-Antipolis et Limoges (mai 2003).

Parallèlement, G.D.F. teste sur son site de Saint Denis un autre type de pile de 1 kW (Société suisse Sulzer-Axis) fonctionnant à 800 - 900°C... et s'intéresse à des systèmes plus puissants (10 kW, 1 MW) développés à l'intention du gros tertiaire et de l'industrie par Rolls-Royce. Quatre nouveaux sites urbains G.D.F. ont été installés en France en 2003.

3.2 - Les Piles à électrolyte polymères (Piles PEMFC, : Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Pour éviter l'électrolyte liquide, on a développé des électrolytes solides, à base de polymères sulfonés (R-SO3H) (Membrane Nafion échangeuse de protons). Cette membrane acide est "perfluorosulfonique", les électrodes (graphite catalysé) sont faciles à réaliser, puisqu'il n'y a pas de fuite d'électrolyte à craindre. Ces piles peuvent fonctionner à température ambiante (de 25°C à 40°C), mais sans dépasser 80°C. Les PEMFC sont très médiatisées en raison de leur application comme pile embarquée dans des véhicules tels que :

- Mercedes Necar II (Daimler-Benz sous licence Ballard, 50 kW), roulant jusqu'à 110 km/heure avec une autonomie de 250 km

- puis Necar III et IV (Mercedes classe A), 50 kW, autonomie : 400 km

- pour 2004, Necar V (75 kW - 600 km d'autonomie)

Cette même technologie a été choisie par le C.E.A. (Commissariat à l'Energie Atomique). et ses partenaires PSA Peugeot-Citroën, Renault, Air-Liquide, Nuvera et Solvay... pour le prototype "Hydro-Gen" de véhicule à hydrogène. Autonomie : 600 km, équivalente à celle des véhicules à essence ; vitesse : 90 à 100 km/h. L'encombrement du véhicule est identique à celui d'une voiture de série. Le réservoir à hydrogène, sous 700 bars, est placé sous le plancher.

Prix d'investissement du kilowatt : 1 200 €... Une étude de l'U.S. Department of Energy (U.S. DOE) conclut que seul un prix de revient de 50 €/kW permettrait une production de masse.

De gros progrès ont été réalisés, mais les quantités nécessaires en platine (0,5 gramme par kilowatt), et le prix des matériaux (5 à 8 € par kW) sont trop importants : Pour équiper 5% de la production automobile annuelle mondiale (2 millions de véhicules) avec des PEMFC de 90 kW, il faudrait 50 tonnes de platine, soit un tiers de la production mondiale annuelle.

3.3 - Perspectives

Une prévision réaliste de piles à combustible pesant dans la balance énergétique passe sans doute par l'élimination, ou le contournement de verrous technologiques :

• La quantité de métaux précieux nécessaires a été divisée par 100 en 20 ans... et les chercheurs prévoient de diviser ce coût par deux.

• Si l'hydrogène devait représenter une proportion notable des besoins énergétiques mondiaux (par exemple, hypothèse de 20% en 2050), les capacités de production devraient être multipliées par un facteur de l'ordre de 25... Sa production représente aujourd'hui 1,5% de la production mondiale d'énergie primaire. L'hydrogène est surtout utilisé comme matière de base par l'industrie chimique et pétrochimique... L'électrolyse de l'eau, solution apparemment privilégiée, requiert de l'énergie électrique.

Au four solaire d'Odeillo, à Font-Romeu, se poursuit l'étude du craquage de l'eau sous l'effet de la chaleur...la solution est à très long terme (50, 60 ans ?...) Gilles Flamant, du CNRS, préconise en attendant le craquage du méthane, le carbone étant alors utilisé comme noir de carbone, lequel sert à fabriquer des pneus, des piles... ou des polymères conducteurs. Le craquage solaire du méthane fait l'objet d'une proposition de projet Européen.

D'autres pistes sont évoquées :

- Les hydrogénases, enzymes qui stimulent la production d'hydrogène par des micro-algues.

- Les nanostructures en carbone, les nanofibres, les hydrures (dont la capacité de stockage est 2 fois supérieure en volume à celle de l'hydrogène liquide).

- Noter aussi les travaux du C.E.A. sur des polymères renforcés par des tissus de fibres de verre, dont les propriétés de conduction sont comparables à celles du Nafion.

3.4 - Conclusion de la "Piste 10"

Nous n'avons pas présenté l'ensemble des piles à combustible : il existe des piles à électrolyte polymère qui peuvent utiliser directement le méthanol (DMFC : Direct Methanol Fuel Cell). E.D.F. "Recherche et Développement", tout en s'appuyant sur les compétences de l'Université de Karlsruhe, participe à des projets européens dont les travaux sont orientés sur les technologies "Alkaline Fuel Cell" (A.F.C.), "P.E.M.F.C." (cité plus haut) et "Solid Oxide Fuel" (S.O.F.C.).

Les piles à combustible sont arrivées aujourd'hui au niveau du développement industriel. Mais la nécessité d'utiliser :

- soit des catalyseurs à base de métaux nobles, donc très coûteux

- soit des températures élevées

...limite leurs applications à des domaines précis :

• ordinateurs portables, téléphones mobiles, lesquels pourraient s'affranchir les premiers des batteries chimiques rechargeables (Programme Toshiba 2003-2004 avec Pile DMFC)

• domaine spatial

• production d'énergie décentralisée (P.A.F.C.) en cogénération.

Des discontinuités technologiques sont attendues en matière de structure des électrodes, des membranes et de production d'hydrogène notamment.

Exemple original d'action E.D.F. sur un site isolé

E.D.F. installe actuellement en France des piles PEMFC de 1 kW électrique, fonctionnant au méthanol, pour l'alimentation des

sites isolés (non raccordés aux réseaux "gaz et électricité"), notamment en complémentarité avec des sources d'énergie renouvelable - panneaux photovoltaïques, éolienne - et des systèmes de stockage d'énergie.

Les groupes électrogènes, qui assurent aujourd'hui tout ou partie de la fourniture électrique des sites isolés, sont assez polluants (gaz d'échappement, bruit et odeurs), et ne satisfont pas toujours pleinement leurs utilisateurs. Ces groupes pourraient donc être avantageusement remplacés par des piles à combustible utilisant un combustible liquide (facilement transportable et entreposable) comme le méthanol, l'éthanol ou le propane (GPL). Les piles à combustible sont en effet silencieuses, peut polluantes (pas de dioxyde de soufre ni de particules), potentiellement très fiables (pas de parties tournantes comme dans un moteur) et d'entretien simple (pas de vidanges ni de démarrages périodiques.

La pile remplace sur le site des Corbières, dans la vallée de l'Aude le groupe électrogène d'appoint et fournit de l'énergie en complément des panneaux photovoltaïques, notamment lors des longues périodes sans soleil, lorsque les batteries, stockant l'énergie produite par les panneaux pour la restituer au particulier à un autre moment, sont vides. La pile a ainsi fourni déjà près de 200 kWh.

Le schéma de principe du couplage avec les panneaux photovoltaïques est le suivant :

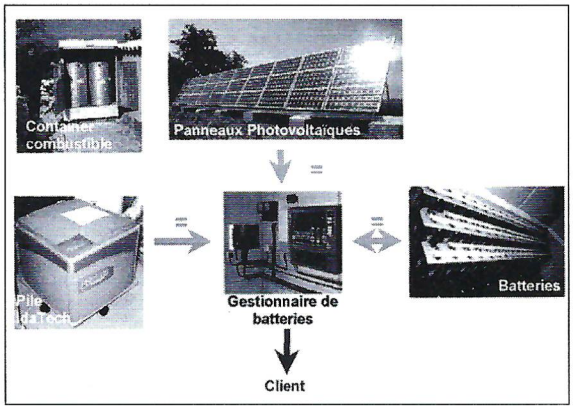


Figure 44

Non seulement, l'efficacité énergétique de la pile à combustible est bien supérieure à celle d'un petit groupe diesel, surtout à charge partielle ; mais aussi, l'utilisation directe du courant continu délivré par la pile pour recharger les batteries minimise les interfaces et augmente le rendement global de l'installation (suppression des pertes liées à la conversion AC/DC). A terme, l'économie d'énergie fossile serait de l'ordre de 40% par rapport à la production d'électricité par groupe électrogène.

E.D.F. R&D étudie les filières combustible de type biocarburant qui seraient particulièrement adaptées à l'utilisation d'une pile à combustible en site isolé, permettant de valoriser la biomasse et les déchets organiques locaux.
[Réf. : Anne-Sophie Coince, Didier Rabaland, Christophe Gaudin (chef de projet) E.D.F. Recherche et Développement].

Certains industriels de l'automobile n'envisagent pas d'applications avant 2010, sauf pour le bus à hydrogène : En milieu urbain, le silence et le caractère non polluant représentent des atouts majeurs. De plus, la longue durée de fonctionnement des bus permet de réduire les coûts d'amortissement ; le fait qu'en fin de journée ils retournent tous dans un même dépôt ("flotte captive") facilite la gestion du carburant. Le prototype Scania/Axame est développé dans le cadre du projet Européen FC-BUS auquel a participé le C.E.A.

Cet autobus fonctionne à l'hydrogène pur. Ce gaz est contenu dans des réservoirs de 800 litres à une pression de 200 bars. Ce volume associé aux systèmes de récupération d'énergie du véhicule (lors des freinages notamment) offre une autonomie de 250 km. La pile du FC-BUS est une PEMFC (électrolyte polymère) composée de deux séries de 110 cellules. Son rendement énergétique élevé lui permet de délivrer jusqu'à 50 kW. Le bus Scania/Axane utilise 2 piles de 50 kW pour prolonger l'autonomie d'un pack de batteries électriques conventionnelles qui assure la puissance.

Le bus à hydrogène représente sans doute une "niche" privilégiée pour la pile à combustible.

Le moteur a atteint un haut degré de perfection et de commodité.

Le seul produit de la réaction est la vapeur d'eau émise par le tuyau d'échappement du bus.

Dix villes européennes sont aujourd'hui équipées en bus issus du projet CUTE fondé par la Communauté Européenne. La puissance unitaire des bus "Citaro" atteint 250 kWe ; Accélération, vitesse et rayon d'action marquent de nets progrès, les catalyseurs platine / carbone sont fournis par la firme célèbre Johnson - Matthey ; la cellule est réalisée par Ballard, le bus par Daimler Chrysler.

Se profile le "moteur hybride" combinant la motorisation électrique et la motorisation thermique. [cf. **le véhicule Prius de Toyota**]. Le passage électrique/thermique se fait de façon insensible pour le conducteur lors des accélérations. La recharge de la batterie se fait sur le moteur thermique, mais aussi par récupération de l'énergie lors du freinage.

Un fait significatif s'est produit au Cinquième Challenge Bibendum, tenu en Californie en septembre 2003, auquel participaient 80 entreprises ou institutions.

Dix huit véhicules à hydrogène participaient à cet événement - "forum ou laboratoire" - qui excluait tout objectif commercial à court terme : alors qu'en 2002, les véhicules au gaz naturel et au gaz de pétrole liquéfié ou encore les véhicules électriques prédominaient, la compétition 2003 (qui imposait à tout prototype un parcours de 250 km) rassemblait des voitures à hydrogène (pile à combustible et moteur à combustion interne), des voitures diesel et plusieurs technologies hybrides.

"Il n'y a plus un seul choix, une seule voie pour atteindre l'objectif d'un transport routier respectueux de l'environnement" (Patrick Oliva, directeur du Challenge), quand on sait que le parc automobile aura quadruplé en 2050 pour atteindre 3,5 milliards d'unités.

Pour le professeur Daniel Sperling, directeur de l'Institute of Transportation Studies à l'Université de Californie, *"la tendance à très court terme inclura la promotion de l'économie de l'hydrogène. La qualité de l'air demeurera la principale motivation pour changer de type de carburant et de système de propulsion,* ***et pour rendre plus disponibles les véhicules à pile à combustible après 2010****".*

"La principale question demeure la façon dont chaque pays ou région résoudra la contradiction entre intérêt public et la volonté personnelle : liberté de mobilité".

"Quant aux poids lourds, ils devraient profiter des développements des biogaz : le méthane issu de la désintégration de la matière organique serait capturé au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère" (John Boesel, président du Calstart, organisation à but lucratif) - [Réf. Doc. Challenge Bibendum. Courtoisie Pierre Loiret. Manufacture Française de Pneumatiques Michelin]

"2003 marquera une date cruciale pour ce qui est de l'émergence des piles à combustible dans le domaine de notre vie quotidienne." (Europhysics News - Déc. 2003)

Références bibliographiques

1 - *"Les générateurs électroniques" Alain Coulombeau in CD-Rom "Regards de Physiciens" Codige - Adasta janvier 2004.*

2 - *"Sur la piste de l'hydrogène" Journal du CNRS N° 160-161. Avril/mai 2003 p. 20-28*

3 - *"Pile à combustible, un atout pour la diversification énergétique" documentation C.E.A. in "Vouloir Savoir " Revue de la Fédération du Conservatoire National des Arts et Métiers. N° 1. 2002 p. 73-80*

4 - *"Une pile à combustible" Philippe Mathevon et Bernard Couraudon. E.D.F.-G.D.F. Auvergne-Sciences N° 51. Décembre 2001 p. 23-26*

5 - *E.D.F. et G.D.F. Rapports 2002 - Courtoisie MM. Bihoues et Fédespina*

Piste 11

La fusion thermonucléaire contrôlée

La splendeur du ciel étoilé nous offre l'une des expériences centrales de la vie : La beauté.
En même temps, le cœur de chaque étoile nous propose le modèle idéal d'une "centrale thermonucléaire contrôlée".

Ainsi, les $3{,}86.10^{26}$ joules rayonnés chaque seconde par le Soleil - que nous appelons Luminosité $L_{\odot}$ résultent de la transformation, pendant la même période, de 600 millions de tonnes d'hydrogène en hélium. Chaque "fusion" implique quatre noyaux d'hydrogène, libérant ainsi, par "excès de masse" $4{,}3.10^{-12}$ joules. La luminosité du Soleil correspond donc à près de 10^{38} fusions par seconde, tandis que 4,2 millions de tonnes de matière sont transformées en énergie de rayonnement.

Dans quelles conditions ?

Le cœur du Soleil est un four nucléaire de température : T = 15,5 millions K
Sous une pression de $3{,}4.10^{11}$ atmosphères, pour une masse volumique de 150 000 $kg.m^{-3}$
Dans de telles conditions , la matière ne se trouve pas sous la forme qui nous est familière (solide, liquide, gaz). L'agitation thermique liée à une température extrêmement élevée arrache la plupart des électrons atomiques, et la matière forme un **Plasma**, milieu constitué d'ions et d'électrons qui ne sont plus liés et sont libres de se déplacer les uns par rapport aux autres. Mais il s'agit d'un très grand nombre d'ions et d'électrons qui vont avoir un comportement d'ensemble : le comportement collectif, où les mouvements individuels des particules chargées se traduisent par des courants et des champs électriques interagissant de nouveau avec elles, ce qui entraîne la complexité, la non-linéarité, et la difficulté de la physique des plasmas prise dans toute sa généralité.

Le principe des réactions de fusion

Imaginons deux noyaux légers du plasma. Ces noyaux portant chacun une charge positive vont tendre à se repousser : il se forme ainsi une "barrière de potentiel" électrostatique qu'il faut franchir avant que ces deux noyaux puissent tomber dans le puits de potentiel créé par les forces d'interactions nucléaires fortes. La barrière répulsive sera franchie si les 2 noyaux se dirigent l'un vers l'autre avec une vitesse relative suffisante. Même au-dessous du seuil de la barrière, l'effet tunnel de la mécanique quantique autorisera la fusion.

1 - Plusieurs types d'avancées ont été réalisées depuis plusieurs décennies :

1.1 - La physique des plasmas a développé à un tel point les outils théoriques et expérimentaux qu'il est devenu possible de cerner quantitativement plusieurs aspects conceptuels des réactions de fusion.

1.2 - De façon plus frappante encore, l'amélioration progressive de la maîtrise des paramètres de plasma a placé les expérimentations comme au seuil d'étapes décisives dans la perspective d'utilisation de combustibles "inépuisables" et aussi peu polluants que possible.

1.3 - La seule réaction de fusion explorable dans un "Laboratoire terrestre" est celle d'un plasma "deutérium-tritium". Les autres réactions de fusion, notamment - "deutérium-deutérium" - suggérée par la grande abondance naturelle de cet isotope de l'hydrogène : 0,2%... requièrent des températures trop élevées.

Séquence des réactions D-T

$$ {}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + n + 17{,}6MeV $$

Sur les 17,6 MeV libérés, 14,1 MeV sont emportés sous forme d'énergie cinétique du neutron, et 3,5 MeV par la particule α, noyau d'hélium 4. Celle-ci sera confinée comme le reste du plasma.
Le neutron s'échappera tout en conservant son énergie : il interagit avec l'environnement du plasma, et finira par être capturé. En particulier, on cherche à favoriser cette capture des neutrons thermalisés suivant la réaction

$$ {}^{6}_{3}Li + n \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{3}_{1}H + 4{,}6MeV $$

Le lithium est le plus léger des métaux alcalins. Composé pour 7,4% de lithium 6 et de lithium 7 pour le reste, le lithium se trouve dans l'état de trace dans presque toutes les roches ignées de la nature. Il existe des minerais plus riches contenant de 4 à 20% d'oxyde de lithium... sans compter sa présence dans l'eau de mer sous la forme de sels dissous (0,2 partie par million)... soit plus de 1 000 ans de réserves...

Dans la réaction précédente, le tritium est donc régénéré. Mais son activité, 500 000 becquerels par kilogramme, sa durée de vie : 12,33 années... imposent des conditions de confinement très strictes.

En 1991, la première réaction de fusion deutérium-tritium a été obtenue pendant 2 secondes : l'énergie libérée était 20 fois supérieure à celle de la réaction (d-d).
Le gain Q, rapport de la puissance de fusion à celle de chauffage, est passé de 10^{-7} en 1965 à l'ordre de grandeur de l'unité en 1995.

2 - Le confinement électromagnétique

Première approche
Expérimentée initialement dans la version dite "TOKAMAK" inventée par les Russes, cette méthode de confinement a permis, en Europe, aux Etats-Unis, au Japon, à partir de 1968, la réalisation de performances de plus en plus proches de celles, espérées, d'un "Réacteur de fusion".
Le plasma est un milieu conducteur : une particule chargée en mouvement est équivalente à un petit courant qui peut interagir avec un champ magnétique. Ce dernier exerce sur la particule une force perpendiculaire à sa vitesse. Cette force de Laplace la fait tourner et lui imprime un mouvement hélicoïdal.
Le terme "tokamak" désigne un anneau servant au confinement magnétique des plasmas de fusion. *"Dans les dispositifs "tokamak" un anneau de plasma est confiné par le champ magnétique du courant propre du plasma, et pour supprimer les instabilités les plus dangereuses propres au plasma, on utilise un champ longitudinal dont l'intensité est très grande par rapport à l'intensité correspondant au courant du plasma" (Lev Artgimovich - 1968).*
Les tokamaks ont été constamment améliorés ; notamment l'ère des grandes machines intervient à partir de 1971.

En 1974, ce fut le Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) à Princeton ; puis le JT-60 au Japon ; le Joint European Torus, ou J.E.T., à Culham près d'Oxford qui intervient 6 mois après TFTR. Ce fut la première machine, grâce à sa section en D, à dépasser un courant de 1 million d'ampères, pendant 2 secondes, et à atteindre plus de 16 mégawatts et un facteur Q de 0,6... se rapprochant ainsi de la condition de "break-even Q=1", où la puissance de fusion est égale à la puissance additionnelle nécessaire au chauffage du plasma.

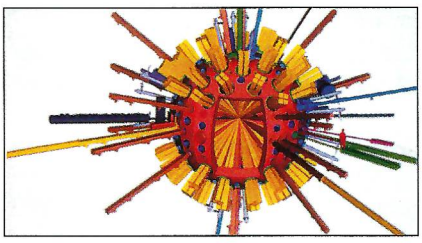


Figure 45 - Représentation de la chambre expérimentale du futur "Laser Mégajoule"

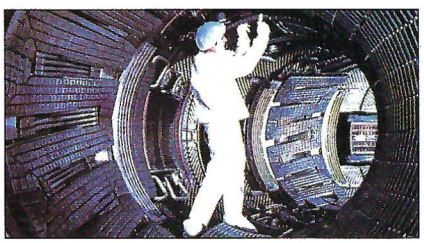


Figure 46 - Vue intérieure de la chambre à plasma du tokamak "Tore Supra" de Cadarache

(Réf. : La Radioactivité - Le rayonnement d'une découverte - Cent ans après. EDP Sciences

Il faut citer. également D III - D plus petit, à San Diego ; en France TFR de Fontenay-aux-Roses, qui a fonctionné de 1973 à 1986, fut le précurseur du JET. TORE-Supra à Cadarache, a montré qu'il était possible de développer une technologie supraconductrice (le niobium-titane avec un bain d'hélium superfluide). Tore-Supra a obtenu des températures de 20 millions de kelvins pendant plus de 4 minutes entre 1973 et 1976... Depuis le JET est parvenu à 300 millions !

Dans le même temps le volume du plasma est passé de 1m³ pour TFR à 100 m³ pour le JET... Il sera de 2 000 m³ pour I.T.E.R. (International Thermonuclear Experimental Reactor) pour lequel Cadarache défend les couleurs de l'Europe face au concurrent japonais Rokkasho-Mura.

Tout comme le JET, I.T.E.R. comprendra 3 sous-ensembles :

• Le premier est constitué par les deux ensembles de bobinages :
Le premier champ magnétique est créé par des bobines situées dans des plans méridiens distribués régulièrement autour de l'axe vertical de révolution. Ces bobines créent des lignes de champ magnétique centrées sur cet axe : **c'est le champ toroïdal.**

Une série de bobines circulaires, centrées sur l'axe de révolution définissant avec le courant de plasma le "**champ poloïdal**" et maintiennent l'équilibre de la configuration.

• Un deuxième sous-ensemble comprend la chambre à vide en D, ses tuiles de protection, le divertor qui sépare la chambre à vide en deux ensembles distincts : le divertor est le siège d'un plasma à haute densité et à faible température qui introduit une barrière contre les impuretés générées par l'érosion des plaques. Ce deuxième sous-ensemble comprend les pompages et injections de gaz.

• Le troisième sous-ensemble est formé par les divers chauffages additionnels : Injection de particules neutres de forte énergie : le chauffage s'effectuant par transfert de quantité de mouvement.
Injection d'ondes électromagnétiques.

I.T.E.R.

Installation expérimentale, "I.T.E.R." a pour objet de démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'énergie de fusion à des fins pacifiques.

Après neuf années de phase d'ingénierie (1992-2001) le projet I.T.E.R. est aujourd'hui dans sa phase juridique : les dossiers détaillés sont disponibles ; l'ensemble des paramètres de la machine est défini, ainsi que toutes les analyses justifiant le dimensionnement.

Sept grands projets ont été programmés, représentatifs des technologies clefs d'I.T.E.R. :

1 - Les aimants supraconducteurs : la technologie supraconductrice (Alliage niobium-étain) doit s'appliquer dans le cadre de champs magnétiques élevés : 13 teslas ! Les 24 bobines toroïdales en D atteignent chacune une hauteur de 17 m, une dimension radiale de 11,50 m et un poids de 400 tonnes.
Même solution pour le solénoïde central : hauteur 15 m ; diamètre 2,8 m ; 1 000 tonnes. La plus grande bobine poloïdale aura un diamètre de 30 mètres... D'où la nécessité sur le site d'I.T.E.R. d'une large zone industrielle... Nous résumons les autres technologies.

2 - Télémanipulation : la conception s'inspirera de JET : ponts roulants, bras articulés, machines de transfert.

3 - Composants à très haut flux thermique (chambre à vide, faite de tôles d'inconal ; peaux interne et externe reliées par des membranes à aile d'avion).

4 - Couverture interne de la machine et première paroi (cette dernière fait face au plasma). Problème des neutrons de 14 MeV et d'une protection neutronique épaisse ; dissipation du rayonnement issu du plasma.

5 - Le divertor (voir suite)

6 - Les chauffages : A l'ignition, un réacteur de fusion n'a pas besoin d'autre chauffage que celui fourni par les particules alpha provenant des réactions deutérium-tritium. Mais pour atteindre cette condition il est nécessaire d'arriver à une température supérieure à quelques 15 keV (140 millions de kelvins). Un chauffage additionnel doit donc être utilisé.

7 - Une chaudronnerie très précise de grandes dimensions (dont les éléments de couverture génératrices de tritium)

... Beaucoup de défis (dont les aimants supraconducteurs en niobium-étain fragiles) sont posés par I.T.E.R. Mais un consensus fort existe à partir des expériences précédentes et de leurs acquis.

3. Analyse énergétique d'un plasma. Examen de quelques contraintes. Critère de Lawson

Bibliographie exploitée

• *L'Energie des Etoiles : La Fusion nucléaire contrôlée. Paul-Henri Rebut. Ed. Odile Jacob. Novembre 1999*

• *Fusion contrôlée dans les plasmas "Tokamak". J. Jacquinot et J.P. Poffe (J.E.T.) Bulletin de la Société Française de Physique N° 99 - Mai 1995) p. 29-32*

• *Documentation C.E.A. Internet*

• *I.T.E.R. A major step towards a fusion reactor. Ron Parker - Max Planck Institue für plasmaphysik in "European News" 29 juin 1998 p. 228-229*

• *Revue Générale Nucléaire. "La physique et la fusion thermonucléaire et le projet I.T.E.R.". Pascal Garin (CEA/DRFC) RGN - avril 2003 N° 2*

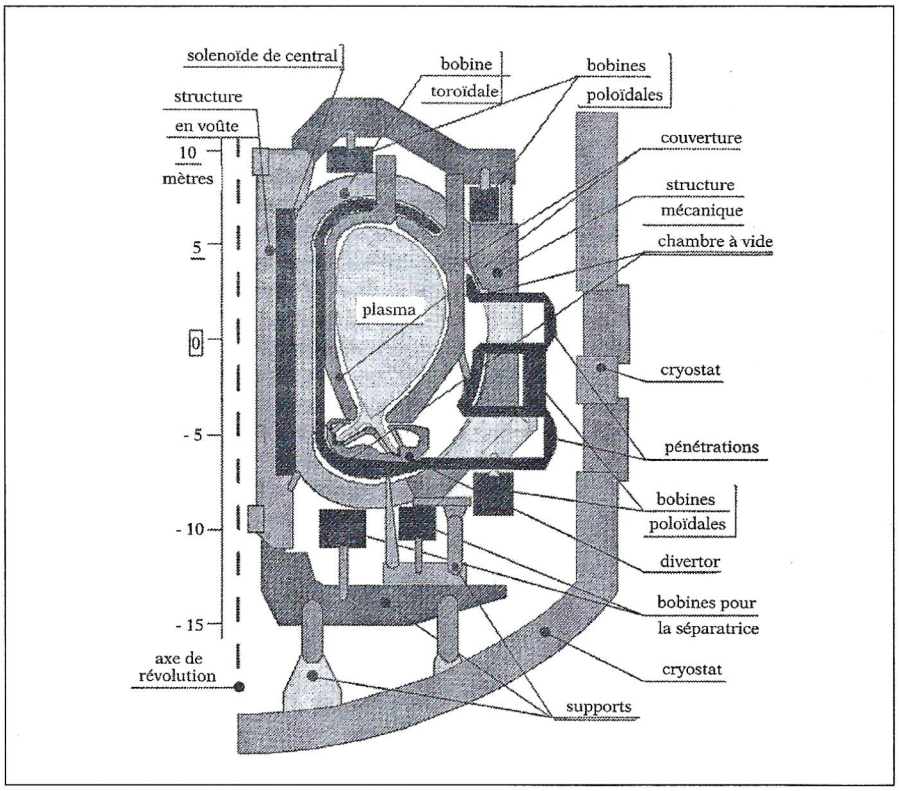


Figure 47 - Section schématique d'I.T.E.R. (Paul-Henri Rebut, "L'Energie des Etoiles" La Fusion nucléaire contrôlée - Ed. Odile Jacob. Sciences p. 234)

3.1 - Energie thermique d'un plasma deutérium-tritium

Modélisations : Aux très hautes températures envisagées dans les programmes "Tokamak" de fusion thermonucléaire (de l'ordre de 100 millions de kelvins), le plasma est totalement ionisé : sans composante neutre, il est la superposition d'un fluide électronique et d'un fluide ionique tels que les densités électronique et ionique sont identiques :

$n_{électrons} = n_{ions}$. **La neutralité du plasma est parfaite**.

Nous supposons de plus les densités relatives au deutérium et au tritium soit : $n_D = n_T$, égales, de sorte que :

$$N_{ions} = n_D + n_T = n_{électrons} = n \text{ où } n_D = n_T = \frac{n}{2}$$

Pour une température uniforme du plasma, températures ionique et électronique sont confondues :

$$T_e = T_i \equiv T$$

Les densités n réalisables aujourd'hui sont de l'ordre de 10^{20} ions par m^3, donc très inférieures à celle de l'air à la pression atmosphérique normale ($2{,}7.10^{25}$ m^{-3}). L'énergie thermique peut donc être identifiée à l'énergie totale du gaz de Maxwell-Boltzmann : les énergies potentielles d'interaction électrostatique sont statistiquement négligeables (les distances mutuelles sont trop grandes **en moyenne**). Seule demeure la composante cinétique.

Pour un volume V de plasma, l'ensemble des deux fluides ionique et électronique donne une énergie totale thermique $W = \frac{3}{2}(2nV).kT$; où k = $1{,}38.10^{-23}$ J.K^{-1} (constante de Boltzmann) soit **W = 3nkT.V**

Limites imposées par le confinement du plasma

La configuration d'équilibre du plasma ou confinement électromagnétique est atteinte lorsque en tout point du volume V, les pressions et tensions exercées par les champs magnétiques compensent exactement la pression cinétique.

• La force magnétique exercée sur le plasma s'exprime par

$-\,grad(B^2/2\mu) + \frac{1}{2}(\vec{B}.grad\vec{B})/\mu$;

μ : perméabilité magnétique du plasma $\cong 4\pi 10^{-7}$ *S.I.*

$B^2 / 2\mu$ désigne la pression magnétique. Le second terme correspond à une tension additionnelle.

Cette pression magnétique, en fait proportionnelle au carré du champ magnétique, s'identifie avec la densité de l'énergie magnétique.
Il faut préciser le sens du champ magnétique concerné lorsque nous sommes au sein du plasma :

Le plasma, gaz d'électrons et d'ions permet aux électrons de se déplacer tout en conservant la neutralité locale : le plasma réagit donc comme un métal conduisant l'électricité [Le courant nominal prévu dans I.T.E.R., dit courant de plasma, sera de 21.10^6 ampères], le courant toroïdal engendre des forces de Laplace qui diminuent le champ magnétique créé par les bobines, créant ce que l'on appelle un effet diamagnétique pour lequel la perméabilité magnétique μ est très voisine de celle du vide μ_0 d'où la valeur adoptée plus haut.

Or la pression cinétique du plasma s'exprime par p = 2nkT et elle est équilibrée par les forces magnétiques : la pression du plasma maximale que l'on peut obtenir est égale à la **pression magnétique globale**.

On peut ainsi caractériser le "taux de remplissage en ions" par le facteur β : rapport de la pression (cinétique) du plasma à la pression magnétique qui existerait si le plasma avait une pression nulle ("plasma vide"). L'objectif normalisé pour I.T.E.R. est $\beta = 2{,}2$.

Une valeur excessive du produit T tendrait à dégrader le confinement magnétique [Pour une densité n correspondant à celle du solide, 4.10^{28} m^{-3} et pour $T = 10^8$K, nous aurions des pressions de plasma gigantesques : plusieurs centaines de millions d'atmosphères ; le système serait explosif.]

Dans la pratique, compte tenu des champs magnétiques réalisables (sauf nouvelles technologies supraconductrices permettant de nouvelles performances) on ne peut guère dépasser :

n de l'ordre de grandeur $n = 10^{20}$ m^{-3} et $T \approx 10^8$ K

3.2 - Contributions des réactions de fusion

L'énergie totale $E_F \equiv E_{fusion}$ produite par la réaction de fusion deutérium-tritium est la somme des énergies de deux produits : La particule α ou noyau d'hélium, le neutron :

$$E_F = E_\alpha + E_\eta ; \quad E_F = 17{,}59MeV$$
$$E_\alpha = 3{,}56MeV$$
$$E_\eta \cong 14{,}03MeV$$

Il est important de suivre le "parcours" des deux produits de la fusion :

• Les neutrons ignorent le champ magnétique et quittent pratiquement tous le plasma sans la moindre interaction. L'énergie qu'ils transportent (14 MeV, soit 80% de l'énergie totale de fusion) sera, "in fine" déposée lors de leur arrêt dans les matériaux des composants qui entourent la chambre à vide du tokamak. Plusieurs objectifs sont "assignés" aux neutrons de 14 MeV, et donc plusieurs contraintes imposées aux structures :

- La première paroi matérielle, face au plasma, doit laisser passer les neutrons, sans pertes majeures, en énergie et en nombre : il s'agit d'une paroi fine et faiblement interactive (en vanadium ou certains de ses alliages, d'épaisseur environ 5 mm).

- La couverture et la paroi suivante ont une double fonction, sachant que la majorité de la puissance fournie par les neutrons de 14 MeV est dissipée dans les premiers 10 à 15 cm (avec une fluence qui devrait atteindre dans I.T.E.R. le MW an par m^2). Le bobinage toroïdal contient une chambre à vide munie d'une couverture capable de protéger les supraconducteurs des neutrons de 14 MeV.

La première fonction des neutrons est d'être, après réduction au régime thermique, absorbés par le lithium 6. Ainsi sera régénéré le tritium absent dans la nature.

La deuxième fonction est le chauffage jusqu'à 300°C environ d'un fluide caloporteur (eau, hélium gazeux, métal liquide). Cette énergie thermique pourrait être récupérée en vue d'actionner ultérieurement la turbine productrice d'électricité par des voies conventionnelles.

On comprend la complexité de toutes ces exigences et sans aucun doute les délais et les coûts qui résultent pour I.T.E.R. de la parfaite association des techniques supraconductrices… à l'autosuffisance du tritium brûlé dans la réaction de fusion (et qui doit être produit dans la couverture "tritigène", puis extrait…)

• **Les particules alpha** piégées par le champ magnétique de confinement constituent la seule source d'énergie spécifiquement nucléaire interne au plasma. Compte tenu de leur énergie de départ les

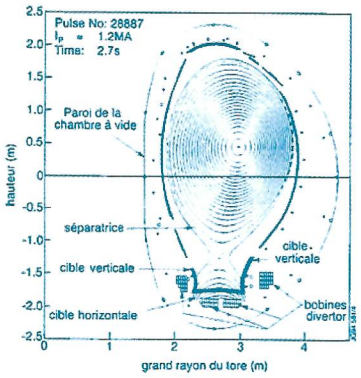


Figure 48

Une section de la configuration magnétique du JET équipé de son divertor.

On remarque les 4 bobines qui créent la configuration magnétique du divertor et les cibles horizontale et verticale qui recueillent le plasma.

Les surfaces magnétiques intérieures emboîtées les unes dans les autres sont représentées ainsi que la séparatrice interne qui limite le plasma confiné.

(Réf. Bulletin de la S.F.P. N°99 mai 1995 p. 30)

particules alpha sont ralenties essentiellement par les électrons de quelques 10 keV qu'elles chauffent. Mais globalement l'énergie cinétique, 3,56 MeV est ainsi transformée - via le chauffage électronique et après un certain temps caractéristique, en énergie thermique de chauffage du plasma... Se posera ensuite le problème de l'évacuation des "cendres" : les particules alpha ralenties dans le plasma finissent par constituer une impureté qu'il faut éliminer. Produit principalement au centre, He sera transporté vers les bords par turbulence. L'augmentation de la densité dans un dispositif appelé "divertor" favorise l'extraction de l'hélium.

Puissance de fusion : L'énergie libérée en une seconde par les réactions de fusion D-T est égale au produit du nombre de fusions par unité de temps, soit N_F, par l'énergie individuelle E_F

N_F est proportionnel à $(n^2/4)$, au volume V du plasma et à un facteur f (T) appelé taux de fusion déterminé par la section efficace de fusion D-T, soit : $N_F = (n^2/4).\ f\ (T).\ V$

L'énergie la plus probable d'une particule du plasma s'exprime par E = kT
Si nous prenons un système d'unités dans lequel k=1, les températures sont exprimées en keV
On vérifiera que T = 10^8K. correspond à 9,1 keV ; 10 keV correspondent à 110 millions de degrés.

L'ensemble des mesures expérimentales de sections efficaces de réactions de fusion D-T conduit, dans le domaine 10-20 keV à : f (T) = $1{,}18.10^{24}T^2$ $m^3.s^{-1}$ (pour T exprimé en keV). Cette valeur sera intégrée dans l'expression de la puissance de fusion :

$$P_F = (n^2/4).\ f\ (T).V.E_F$$

dont seule une fraction , contribue au chauffage du plasma. Mais ce chauffage est contrarié par trois types de pertes.

3.3 - Pertes d'énergie

Elles sont de trois natures :

a) - Le confinement magnétique n'est jamais parfait. Une double diffusion se produit à partir du cœur du plasma.

- Diffusions thermiques par conduction, convection et turbulences (ces deux dernières liées à des gradients élevés de température).. provoquent le refroidissement du plasma.

- La diffusion des particules, phénomène plus complexe que la diffusion de la chaleur (où ions et électrons doivent être traités séparément).

b) - Deux pertes par rayonnement refroidissent le plasma :

- Le rayonnement de freinage ou "bremsstrahlung" d'origine quantique est émis par les électrons du plasma au cours de leur accélération par interaction coulombienne avec les ions D et T du plasma. Pour une interaction donnée, la perte d'énergie est proportionnelle à Z^2/M^2 - Z et M : charge et masse de l'ion concerné.

- Pour l'ensemble du plasma, la puissance ainsi rayonnée croît avec le carré de la densité, la racine carrée de la température électronique et la **présence d'impuretés** de nombre atomique élevé.

- Pour maintenir une ignition dans un futur réacteur thermonucléaire, une limitation de la température du plasma et celle du taux d'impuretés, même si elles sont complètement ionisées, s'imposera.

- Le rayonnement "synchroton" est émis par les électrons du plasma au cours de leur mouvement de type hélicoïdal autour des lignes de champ.

c) - Le problème des impuretés issues du dégazage des parois et des réactions liées à leur bombardement par des particules chargées ou neutres (dont les neutrons de 14 MeV) en provenance du plasma : les éléments légers seront rapidement ionisés et ne contribueront qu'au rayonnement de freinage ; les éléments lourds, même aux températures thermonucléaires, possèdent encore des électrons atomiques : il en résultera au sein du plasma des émissions de raies spectrales liées aux transitions de la physique atomique.

En résumé : les impuretés génèrent un rayonnement qui refroidit le plasma et réduisent la concentration des noyaux D et T directement liés aux réactions de fusion.

Même si on sait qu'en raison de leur nombre atomique faible, les particules (Hélium 4), cendres de la réaction peuvent être tolérées jusqu'à une concentration d'environ 20%, le contrôle des impuretés plus lourdes, couplé avec l'évacuation de la puissance arrivant à la paroi sous forme de particules chargées sont les problèmes principaux dont la solution commande l'avenir de la fusion thermonucléaire . Cette solution passe par l'utilisation de faible Z (carbone, bore, lithium, béryllium) et par l'utilisation d'un déflecteur magnétique baptisé "divertor" (déjà évoqué au sujet des cendres "hélium"). Le divertor est gourmand en volume. Son rôle est multiple : contrôler le premier contact du plasma avec une paroi matérielle, améliorer le confinement en maintenant la densité et la composition du plasma, pomper l'hélium et retenir et contrôler les impuretés.

La conception et la réalisation du divertor qui prennent en compte toutes les contraintes technologiques et les difficultés physiques constituent l'un des challenges d'I.T.E.R.

L'ensemble des pertes d'énergie (Diffusion, Rayonnement, Impuretés) sera regroupé sous le terme de "pertes" par unités de temps, soit :

$$P_{pertes} \equiv P_p$$

Pour obtenir une condition de stationnarité du plasma, il est nécessaire de compenser les pertes par l'apport d'un système complexe de chauffage additionnel.

3.4 - Chauffage additionnel (ou extérieur) du plasma

Nous nous limitons aux modes de chauffage envisagés pour I.T.E.R.

• La méthode la plus appropriée est sans doute l'injection dans le plasma de faisceaux de particules neutres : deutérium ou tritium. Leurs énergies doivent être supérieures au MeV, afin de pouvoir atteindre le cœur du réacteur. (Un faisceau d'ions ne pourrait pas franchir la zone du champ magnétique de confinement). Les neutres rapides sont ionisés par le plasma, puis transfèrent leur énergie aux ions du plasma, ou aux électrons, suivant les valeurs d'énergie relative mises en jeu.

• L'autre méthode peut être le chauffage par ondes de radiofréquence.

Ces deux méthodes ont été éprouvées, et ont permis d'atteindre les températures requises dans les grandes machines précédentes. Il reste à les adapter à un volume utile de 2 000 m^3.

La puissance addionnelle de chauffage sera notée

$$P_{ext.} \equiv P_e$$

3.5 - Condition de stationnarité du plasma :

Elle est définie $dW/dt = P_\alpha + P_e - P_p$

$P_\alpha + P_e$ forment le terme "source"

si dW/dt > 0, le plasma gagne de l'énergie $P_\alpha + P_e > P_p$
si dW/dt < 0 : le plasma se refroidit
si dW/dt = 0 : le plasma est stationnaire

soit : $P_\alpha + P_e = P_p$

3.6 - Paramètres caractéristiques : Définitions

a) - Le temps de confinement t_E : Il est défini par $W/t_E = P_p$; si on coupe brutalement la source extérieure :

$t_E = \frac{W}{P_p}$ caractérise l'extinction énergétique du plasma, ou "vitesse de refroidissement en l'absence d'apport énergétique". Ce temps augmente avec le courant de plasma et se dégrade avec la puissance de chauffage P_e

b) - Facteur d'amplification : $Q = P_F / P_e$

Si Q > 1, les réactions de fusion produisent plus d'énergie que la source de chauffage externe du plasma. Dans le cas du J.E.T. Q ≈ 0,64

Pour Q = 1, **$P_F = P_e$** ; même si la puissance de chauffage interne d'origine nucléaire est inférieure à P_F, on se rapproche de la situation "réacteur"

Q = 1 correspond au "break-even"

c) - Ignition : Elle correspond à **$P_\alpha = P_{pertes}$**

Le chauffage "extérieur" peut être coupé **$P_e = 0$ donne Q infini**

3.7 - Démonstration du critère de Lawson

On considère l'état stationnaire dW/dt = 0
Soit $P_\alpha + P_e = P_p = W/t_E$ où $P_e = P_F / Q$
$P_\alpha + P_F / Q = W/t_E$, soit $P_F (P_\alpha / P_F + 1/Q) = W/t_E$
Mais $P_\alpha / P_F \equiv E_\alpha / E_F$

Il reste à remplacer W et P_F par les expressions trouvées en 1 et 2 et à utiliser les valeurs numériques de E_α, E_F et f(T)
La formule intermédiaire obtenue : $= [(12k / E_F ((E_\alpha / E_F) + 1/Q)] \times [T / f(T)]$

conduit à : $n.T t_E = 2{,}6.10^{21}\, keV m^{-3} s$

C'est le critère de Lawson (dans le domaine de températures comprises entre 10 et 20 keV). Dans la pratique on l'écrit sous la forme : $\boxed{n.T.t_E > 10^{21}\, keV.m^{-3} s}$

Les densités de plasma réalisables dans les tokamaks (quelques $10^{20}.m^{-3}$) et la limite du produit nT imposée à la pression cinétique par la stabilité du confinement magnétique (soit, en keV pour T, nT ≈ 10^{21}) montre que l'effort, par rapport au critère de Lawson va porter sur le temps de confinement, donc sur la réduction des pertes.

Objectif : t_E supérieur à une 1 seconde

4. Progrès des recherches en fusion :

De 1960 aux grandes machines actuelles (J.E.T., T.F.T.R. (U.S.A.), et JT60U au Japon), 3 ordres de grandeur ont été gagnés. Les derniers résultats frôlent le **break-even**. Il ne reste plus qu'un facteur 10 à gagner pour entrer dans le domaine du "réacteur de fusion". Le graphique suivant représente l'évolution du produit $nT t_E$ en fonction de la température T ionique (en keV) sur l'axe, pour les tokamaks construits entre 1960 et 1993. Quelques valeurs de Q sont indiquées

TORE-SUPRA est représenté légèrement à droite et un peu plus haut que ALC-C

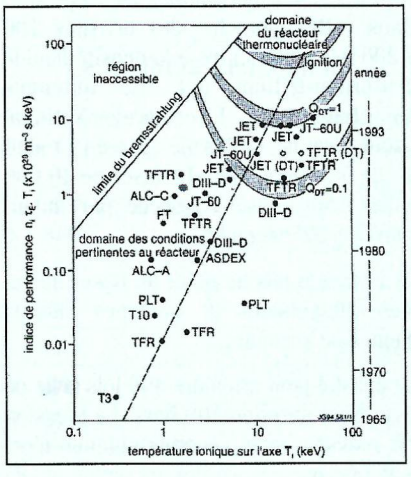


Figure 49 - Indice de performance (exprimé par le produit densité X temps de confinement de l'énergie X température ionique sur l'axe pour un nombre de tokamaks construits pendant la période 1965-1993 (QDT = puissance de fusion produite / puissance injectée dans un plasma deutérium 50% - tritium 50%) (Réf. Bulletin de la S.F.P. (99) mai 95 - P. Jacquinot et J.P. Poffé)

Problèmes de stabilité du Plasma

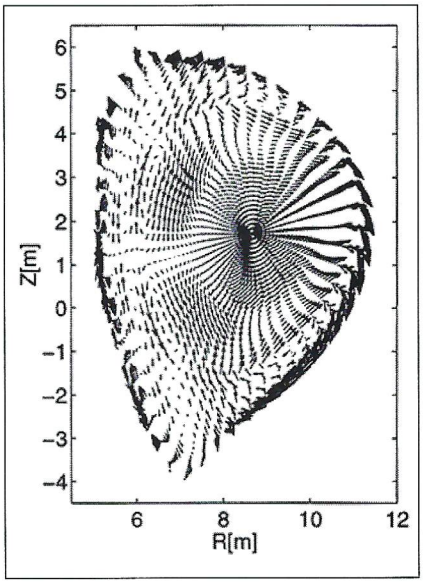


Figure 50
Mouvement du plasma instable dans I.T.E.R. lorsque la pression est supérieure à la limite idéale

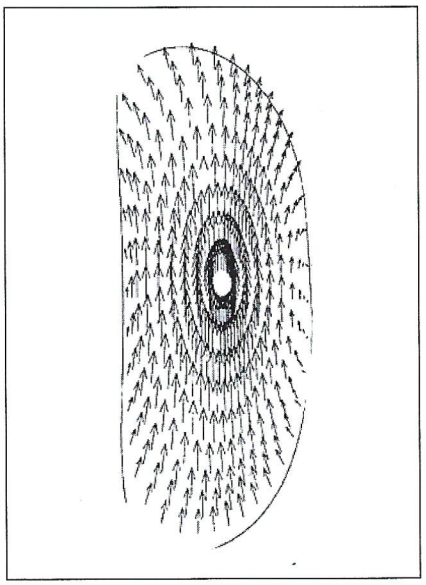


Figure 51
Mouvement vertical instable dans un plasma tokamak étiré

[Réf. : Laurent Villard - Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne - Suisse. Europhysics News Vo. 29 N° 6 Nov./Dec 1998 p. 214]

Remarques

Le futur réacteur n'a pas besoin d'être à l'ignition pour fonctionner.
Il suffit que Q soit assez grand pour que le rendement global devienne intéressant : grâce à la conversion de l'énergie thermique en électricité (via une turbine...) tandis qu'on réutilise une partie de l'énergie **produite pour alimenter le chauffage additionnel servant à entretenir le plasma**.

Les partenaires

L'Union Européenne, Etats-Unis, Russie, Japon, Chine, Canada, Corée du Sud.

Paramètres I.T.E.R définis par "Engineering Design Activities" (E.D.A.)	
Rayon maximum	8,14 m
Rayon minimum	2,8 m
Courant de plasma nominal	21 MA
Champ toroïdal à R = 8,14 m	5,68 T
Facteur de sécurité q (q : Rapport intensité champ toroïdal/intensité champ poloïdal)	~ 3
Température moyenne	12 keV
Densité moyenne	$1x10^{20}$ m^{-3}
Fractures d'impuretés (Be, He, Ar)	0,02. 0,09.0,002
β normalisé	2,2
Puissance nominale de fusion	1,5 GW
Durée de confinement	1 000 s
Energie magnétique du plasma	1,1 GJ
Energie cinétique du plasma	1,1 GJ

Le coût

Le projet est estimé à 4,7 milliards d'€ pour la construction prévue sur 10 ans et 4,8 milliards d'€ pour l'exploitation programmée sur 20 ans.

Le partenaire qui accueillera I.T.E.R. (Europe ou Japon) paiera 40 à 48% de la partie commune du coût de la construction. Les U.S.A., la Chine, la Russie, la Corée du Sud : 10% chacun. (La part du Canada n'est pas arrêtée). Le partenaire choisi à la mi-février 2004 prendra en charge une partie non commune (900 millions d'€). Si l'Europe l'emporte, la France devra payer 50% de ces 900 millions d'€, le complément étant assuré par Euratom. La France paierait ainsi, au total, 824 millions d'€. Bien sûr, d'importantes offres d'emplois sont attendues.

Conclusion sur I.T.E.R.

I.T.E.R. se propose de maximiser les trois facteurs de critère de Lawson et leur produit :

Temps de confinement t_E
Densité de plasma n_e
Température T

I.T.E.R. correspondra "à un très grand pas scientifique" en fournissant un maximum d'informations et de caractéristiques de performances : qualité du confinement, profil de pression et de températures, contrôle des instabilités, observations fines de l'interaction plasma-paroi, maîtrise du plasma de bord, compréhension des phénomènes atomiques dans le divertor, structure optimale du divertor, maîtrise des neutrons.

"Le projet I.T.E.R. devrait prouver qu'un grand pas en avant de la recherche de fusion a été accompli".
...jusqu'à l'ignition ? Un gain d'environ Q = 10 semble être la limite supérieure de I.T.E.R. : soit 400 MW d'énergie de fusion pour 40 MW de chauffage pendant 400 secondes. (Alors que les équipes du JET ont porté l'énergie de fusion à 16 MW pour Q = 0,6).

Le ratio 400 MW/40 MW sera-t-il suffisant, compte tenu des pertes par fuites ?

N'oublions pas que l'objectif d'I.T.E.R. est la préparation d'un Réacteur de démonstration en fusion pure de 800 MW (DEMO) qu'il serait possible de construire en 2025, et qui serait payé par l'électricité qu'il produirait.

"Un réacteur de fusion de 1000 MWe consommerait, par an, 100 kg de deutérium, 150 kg de tritium et 350 kg de lithium dans ses couvertures pour fabriquer du tritium" [Réf. Christian NGO. "l'Energie" Dunod. Août 2002 p. 139].

5 - Le confinement inertiel

Cette méthode suit une évolution comparable au confinement magnétique.

Le principe : compression et chauffage d'un mélange deutérium-tritium enfermé dans des microbilles de verre, sous l'action de lasers de puissance.

Dans cette approche, des densités 100 à 200 fois supérieures à la densité liquide deutérium-tritium ont été obtenues au Lawrence Livermore National Laboratory de Californie, par un produit $n t_E$ de $5 . 10_{14}$ s. cm^{-3} (Le laser de 40 000 joules "Nova laser" procède par impulsions de 10^{-9} seconde).

La France a mis au point un Laser mégajoule (impulsions de quelques milliardièmes de seconde).

La densité peut atteindre 400 fois celle de l'eau et la pression 109 bars. La pression est réalisée, mais l'énergie obtenue n'est toujours que de l'ordre du millième de l'énergie injectée.

L'objectif du confinement inertiel est la réalisation des intensités de 100 terawatts par cm^3 nécessaires au processus d'amorce des fusions thermonucléaires efficaces.

"Voie prometteuse, mais spéculative tant qu'un important travail de recherche n'est pas réalisé" (Michael Key. Livermore)

Parmi les autres pistes de confinement inertiel citons les "Accélérateurs d'ions lourds", les Faisceaux intenses d'ions légers déposant jusqu'à 1 000 TW dans une microbille DT de 1 gramme.

6 - Conclusion

Le potentiel de la fusion thermonucléaire est énorme ; mais les difficultés : stabilité d'une part, rendement d'autre part, le sont aussi. On ne peut aujourd'hui évaluer les délais nécessaires pour "qu'une station de puissance entre en scène".

Le chemin de la fusion contrôlée s'avère long et ardu, beaucoup plus rude et exigeant que ne l'imaginaient les pionniers des années 1950. Mais le développement extraordinaire de la Physique des plasmas de très haute énergie, puis la réalisation et les performances du J.E.T. et des grands Tokamaks nous semble montrer que : Physiciens de la fusion, Ingénieurs et industries de pointe ont les connaissances et la capacité de réaliser le rêve d'une énergie propre, indéfiniment disponible et qui corresponde aux besoins croissants du XXI^{ème} Siècle.

Le défi relève d'une maîtrise de l'énergie thermonucléaire pacifique répondrait au "Principe Responsabilité" de Hans Jonas évoqué au début de cet essai.

Piste 12

Bilan "pour un bouquet énergétique" réaliste et respectueux de quatre conditions

- **Sobriété énergétique**
- **Efficacité énergétique**
- **Respect de l'environnement**
- **Solidarité internationale**

Sobriété

• Pour le transport des personnes, une voiture particulière (avec quatre passagers) consomme trois fois plus d'énergie par passager et par km, qu'un TGV de mille passagers

• Quant au transport des marchandises, un litre de fuel permet de transporter une tonne de marchandise sur 30 km, alors que ce même litre de pétrole permet la même quantité de marchandises sur 100 km par train, et même 120 km par voie d'eau.

• Dans le secteur résidentiel, un bon entretien de la chaudière permet d'améliorer son rendement et de gagner 10 à 20% d'énergie.

• Dans le domaine de la consommation d'électricité pour l'éclairage : dans les années 1920, l'ensemble des seules lampes à incandescence consommait 20% de l'énergie totale des Etats-Unis : une lampe à incandescence "fournit" 25% de lumière et 75% "d'énergie thermique".

La direction de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) estime que le choix d'appareils à basse consommation associé à la généralisation de l'éclairage performant dans les logements et le tertiaire permettrait d'économiser en 2010 environ 15 TWh, soit la production de deux centrales nucléaires !

Mais l'effort de la sobriété "énergétique" - tandis que nous sommes passés de 0,3 tep de consommation par personne et par an, à 4,15 tep en 200 ans, doit être conçu comme un "effort continu à long terme" visant à la création d'irréversibilités liées aux infrastructures, au développement du champ de technologies plus efficaces, et à la modification des comportements.

Les gains réels en efficacité énergétique de ces dernières années ont été contrebalancés par les effets de la "décohabitation". De même ce qui a été gagné en efficacité énergétique au niveau des moteurs a été perdu à cause de la tendance des consommateurs à acheter de plus grosses cylindrées avec plus d'options consommatrices d'énergie.

Le milliard et demi d'habitants des pays industrialisés monopolisent les ressources mondiales et les utilisent mal.
"25% des habitants de la Planète consomment 75% de l'énergie mondiale". Sur les six milliards d'habitants de la Planète, deux milliards environ survivent sur les énergies traditionnelles en les mésusant.. (destruction des forêts et des sites boisés).

Efficacité et économie énergétiques

La cogénération permet la production conjointe d'électricité et de chaleur décentralisée. Elle peut être utilisée dans de nombreuses filières.

Les rendements thermiques (irréversibilité comprise) peuvent passer de 30% à plus de 45%. D'où la possibilité d'économie substantielle. (Nous avons donné, en piste 5, un exemple prometteur de Trigénération.)

Le tableau suivant présente (d'après Stéphane His et Jean-François Gruson, de l'Institut Français du Pétrole) une comparaison des différents rendements pour deux types de filières :
- Filières thermiques
- Filières hybrides

(voir figure 54 en page suivante)

Nous avons évoqué en Piste 5 les progrès réalisés en matière de réduction de pollution liée à l'utilisation des énergies fossiles et en Piste 6 les politiques et techniques de prise en compte et de traitement des déchets nucléaires.

Respect de l'environnement (Atmosphère, Océan, Fleuves, Terres) *Réf. AEE 2001*

(Voir tableau en page suivante)

Cas de la France

La protection de l'atmosphère reste un problème majeur. L'indice ATMO est calculé sur la base de 3 polluants au minimum. Il varie de 1 (qualité excellent) à 10 (exécrable)

SO_2, NO_2, O_3 et poussières

L'indice ATMO est médiocre 57 jours par an dans les grandes villes, surtout l'été, soit plus d'un jour par semaine : l'ozone étant responsable de près de 50 jours de qualité de l'air médiocre. La loi sur l'air ne se met en œuvre qu'à marche réduite (notamment les programmes qui doivent favoriser les transports collectifs et les moyens peu polluants).
Un problème précis : les particules fines émises par les sites mal protégés.

Le sol une ressource menacée

Les sites pollués par l'industrie constituent un problème majeur : le recensement conduit par le Ministère de l'Environnement fait état de 3 000 sites pollués en 2001. Ce chiffre évolue à la hausse chaque année (896 sites recensés en 1996). D'autres estimations font état de 3 000 sites, en moyenne, pollués ou contaminés, par département, soit 30 000 sites au total , en comptant toutes les stations-service abandonnées.

Autre préoccupation : l'épandage des boues de stations d'épuration, dont 65% sont épandues sur les terres agricoles.
(Il faut y ajouter les pertes de matières organiques liées aux méthodes de l'agriculture pratiquée sur les sols fragiles).

Le meilleur rendement

Filières thermiques	Rendement de la filière de production du combustible	Rendement moyen du groupe moto-propulseur	Rendement global
Essence Injection*	80 - 85%	20%	17 - 16%
Diesel Common rail*	85 - 90%	25%	21 - 23%
Filières hybrides			
Pile à hydrogène (électrolyse)	15 - 25%	37 - 52%	5,5 - 13%
Pile à hydrogène (méthanol)	48 - 60%	37 - 52%	18 - 31%
Pile à hydrogène (méthane)	40 - 60%	37 - 52%	15 - 31%
Hybride Série diesel*	85 - 90%	32 - 59%	27 - 34%

**Normes 2005 : normes de teneur en soufre des carburants retenus au niveau européen en 2005 (Réf. "La Recherche" - Oct. 2002 p. 65)*

Nous n'avons pu traiter en détail certaines sources d'énergie génératrices d'économies, soit en réduisant les pertes d' énergie thermique soit en exploitant des ressources potentielles :

La thermoélectricité :
Module de générateur thermoélectrique

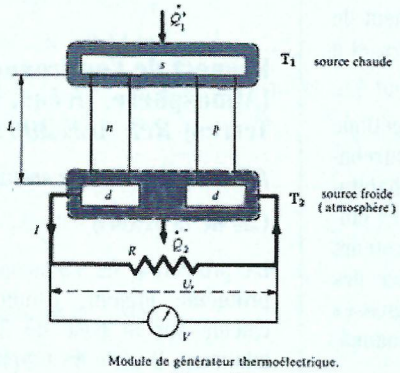


Figure 52

La pompe à chaleur ou thermopompe

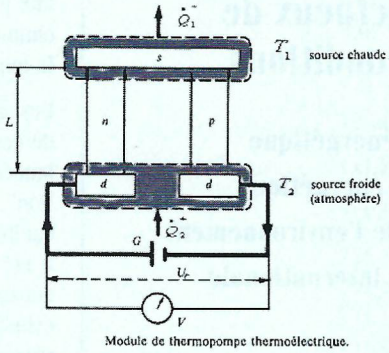


Figure 53

(D'après Thermodynamique et Energétique de Lucien Borel. - Vol.1 3e édition. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 1987)

La géothermie

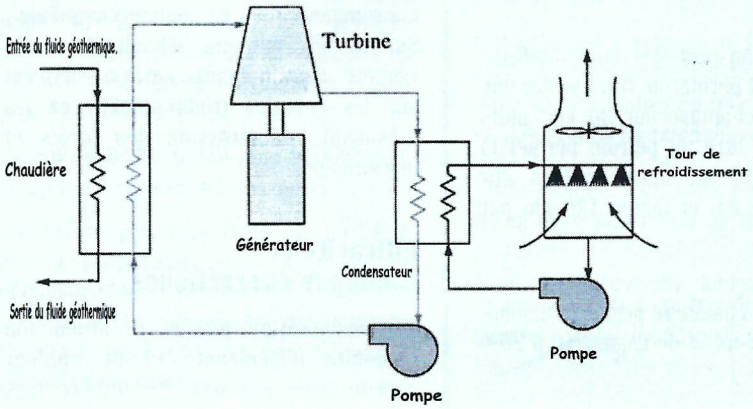


Figure 54

(Schéma d'un cycle d'alimentation géothermique - d'après Thermodynamics 6e édition MacGraw-Hill International. Editions 1999 p. 933.)

Qualité des eaux

La pollution est due essentiellement aux rejets des nitrates, pesticides, herbicides ; interviennent aussi : certains composants de matières plastiques et les détergents.

Cependant la "consommation" réelle des centrales thermiques et électriques a considérablement diminué grâce aux progrès et techniques nouvelles.

Les déchets

En France, la production d'ordures ménagères était en 1998, d'un peu plus de 1 kilogramme par habitant et par jour, en progression de 7% en 5 ans ; le nombre d'emballages mis sur le marché a augmenté de 12% entre 1994 et 1999.

Dans le même temps, la consommation finale des ménages des produits de l'industrie progressait de 8% en volume.

Les tonnages mis en décharge n'ont cessé de croître (+ 244% en 25 ans).

Des efforts significatifs sont réalisés dans des secteurs privés :

Evolution (en %) des émissions de gaz à effet de serre depuis 1990 dans les 15 Etats membres de l'U.E. par rapport à l'objectif de Kyoto

	Evolution 1998 - 1999	Evolution 1990 - 1999	Objectifs 2008 - 2012 en vertu du protocole de Kyoto et du partage de charge de l'U.E.
Autriche	0,0	+ 2,6	- 13,0
Belgique	- 3,4	+ 2,8	- 7,5
Danemark	- 4,6	- 4,6	- 21,0
Finlande	- 0,8	- 1,1	0,0
France	- 2,2	- 0,2	0,0
Allemagne	- 3,7	- 18,7	- 21,0
Grèce	- 0,7	+ 16,9	+ 25,0
Irlande	+ 2,5	+ 22,1	+ 13,0
Italie	+ 0,9	+ 4,4	- 6,5
Luxembourg	+ 4,6	+ 43,3	- 28,0
Pays-Bas	- 2,9	+ 6,1	- 6,0
Portugal	+ 2,9	+ 22,4	+ 27,0
Espagne	+ 6,1	+ 23,2	+ 15,0
Suède	- 2,6	+ 1,5	+ 4,0
Royaume-Uni	- 6,5	- 14,0	- 12,5
Total U.E.	- 2	- 4,0	- 8,0

Gaz : CO_2 , CH_4 , NO + hydrofluocarbures (perfluorocarbones) texafluorum de soufre.

• Conception des bandes de roulement des pneumatiques / Recyclage obligatoire des mêmes pneumatiques et interdiction des décharges correspondantes.

• Utilisation des pneumatiques usagés réduits en poudre, en vue de la confection de revêtements routiers…

• Récupération énergétique des déchets (cf. Expérience TRIRU - E.D.F.) après séparation des PVC, métaux, etc…

Gouttes d'eau dans un Océan ? Tout au moins orientations citoyennes

Solidarité

Le tableau suivant donne une comparaison de l'Europe des 15 et de ses pays constitutifs avec les U.S.A., le Japon, le Monde et quelques pays de l'Europe de l'Est, de l'Afrique et de l'Asie, en termes de :

- Population
- Consommation d'énergie
- Consommation de protéines animales
- Revenus

Exprimés par habitant et en % du Monde.

Ces modes d'expression permettent d'apprécier la richesse des pays et leur consommation relative d'énergie par comparaison avec leur population.

Les plus gros consommateurs d'énergie par rapport à leurs revenus sont : les U.S.A., la Finlande, la Suède, la Belgique, les Pays-Bas, la France, le Royaume Uni, mais il est nécessaire de tenir compte de la latitude pour la Finlande et la Suède.
(Réf. Guy Fauconneau - directeur de Recherches Honoraire I.N.R.A. , membre de la Académie d'Agriculture)

Les corrélations tragiques exprimées par le tableau précédent, entre pouvoir d'achat,

LE PROTOCOLE DE KYOTO

Etablit trois priorités pour atteindre l'objectif de réduction des émissions polluantes en 2012 de 5% sous les niveaux de 1990

Projets Energétiques

• réduire la consommation de combustible fossile

• réduire l'émission de gaz (G.E.S.)

Projets Puits de carbone

Projets de Substitution

• production ou utilisation de produits de base en substitution à des produits industriels

	1998 Consommation d'énergie / an		1998 (Banque Mondiale) Revenus ($ 1998) / an		1995 Consommation de protéines animales		1998 Population	
	tep* par habitant	% du monde	PIBppa par habitant	% du monde	Grammes / habitant et par jour	% du monde	Millions d'habitants	% du monde
Allemagne	4,23	3,95	22,169	4,83	57	3,24	82,10	1,39
Autriche	3,44	0,32	23,166	0,50	66	0,36	8,10	0,14
Belgique	5,61	0,65	23,223	0,63	65	0,45	10,20	0,17
Danemark	3,99	0,24	24,218	0,34	68	0,25	5,30	0,009
Espagne	2,73	1,23	16,212	1,69	66	1,78	39,50	0,67
Finlande	6,43	0,38	20,847	0,28	63	0,22	5,20	0,09
France	4,22	2,85	21,175	3,31	76	2,76	59,4	1,01
Grèce	2,43	0,29	13,943	0,39	59	0,43	10,60	0,18
Irlande	3,40	0,15	21,482	0,21	71	0,16	3,80	0,06
Italie	2,84	1,86	20,585	3,14	58	2,25	57,80	0,98
Luxembourg			33,505	0,04			0,40	
Pays-Bas	4,80	0,87	22,176	0,92	70	0,75	15,90	0,27
Portugal	2,05	0,23	14,701	0,39	62	0,41	10,00	0,17
Royaume Uni	3,86	2,62	20,336	3,19	53	2,16	59,80	1,01
Suède	5,87	0,59	20,659	0,49	68	0,47	8,90	0,15
UE 15	3,788	16,23	20,455	20,35	62	15,7	377	6,39
U.S.A.	8,08	25,31	29,605	21,23	70,5	13,4	275,60	4,67
Japon	4,08	5,46	23,257	7,80	53	4,57	126,10	2,14
Monde	1,49	100	64	100	26	100	5900	100
Bulgarie	2,44	0,23	4,809	0,11	36	0,22	8,20	0,14
Hongrie	2,38	0,27	10,232	0,27	46	0,36	10,00	0,17
Pologne	2,4	1,06	7,619	0,78	48	1,30	38,80	0,66
Roumanie	1,73	0,44	5,648	0,34	40	0,65	22,30	0,38
Slovaquie	3,30	0,20	9,099	0,14			5,40	0,09
Rép. Tchèque	3,75	0,43	12,362	0,34			10,20	0,17
Cameroun	0,419	0,07	1,474	0,06	11	0,09	15,00	0,25
Burkina Fasso			870	0,02	8-7	0,04	11,60	0,20
Nigéria	0,705	1,00	795	0,25	8	0,50	125,00	2,10
Inde	0,482	5,48	2,077	5,40	9	6	1000	17,00

consommation journalière moyenne en kilocalories, niveau d'alimentation en protéines, consommation énergétique... deviennent encore plus frappantes si nous prenons en compte le taux et le niveau de scolarisation, et les indices de développement scientifique et technique... Cette situation est le signe d'un monde marqué par l'injustice à un niveau planétaire. Cette injustice constitue une négation de la dignité humaine et pose un défi : celui d'un mouvement profond de solidarité, qui ne saurait se limiter à un "pansement ponctuel" ou à une "béquille".

Les scientifiques, dont les découvertes appartiennent au patrimoine de l'humanité, possèdent deux moyens d'action :

• Contribuer à la formation scientifique et à l'information de la Jeunesse des Pays en Voie de Développement

Des possibilités existent : en 1985, l'auteur de ces lignes était en séjour dans un Centre de Promotion de la Santé du Nord-Cameroun, à Tokombéré, tout près du Tchad et du Nigéria. Presque toutes les nuits des malades, des femmes enceintes arrivaient à l'hôpital pour des urgences ; le même scénario se reproduisait chaque fois : l'infirmier de garde réveillait médecin et chirurgien. Pendant que l'infirmier (ou le médecin, ou le chirurgien), préparait et rassurait le patient, les deux autres s'occupaient de la première priorité : faire démarrer le groupe électrogène. Il nous est arrivé de participer à l'opération, et quand le "groupe" s'obstinait à refuser de "partir" - usure, difficultés de la maintenance - nous étions tous angoissés.

Aujourd'hui Tokombéré, ville de 6 000 habitants, chef-lieu d'un arrondissement de 60 000 personnes pour 1 000 km², est alimentée par le réseau hydroélectrique : Grâce à l'action humanitaire d'une organisation Non Gouvernementale (O.N.G.) et d'E.D.F., sans aucune publicité tapageuse, des radiographies et des opérations sont réalisables à tout instant ; des puits ont été creusés et tout l'hôpital est alimenté en eau courante. Les malades ont plus de confort, les bébés voient leurs chances de survie augmenter : **en effet, la "chaîne du froid" essentielle à la conservation des médicaments et des vaccins est assurée**. Il n'y a plus de méningites en période du redoutable Harmattan qui charrie les sables et bactéries du désert.

...Mais cela ne suffisait pas, le Docteur Christian Aurenche, lauréat du "Grand Prix Sasakawa de l'O.M.S." pour son action de développement et de santé dans les villages, a pris l'initiative de créer un Collège d'Enseignement Général et Technique, avec après-midi expérimentales (initiation "santé", "plantations", "maintenance"). *"Un développement technologique sans formation serait une escroquerie"*. Telle était également la conviction d'Abdus Salam, Prix Nobel de Physique d'origine pakistanaise, qui créa une Ecole Internationale de Physique à l'intention des étudiants des Pays en Voie de Développement.

Formation donc et **Information** (Livres, revues, documents multimédias, missions en vue de collaborations : identifiant les problèmes, les ressources locales, responsabilisation des personnes, etc...). Mais il n'est pas de Solidarité sans Justice dans les politiques d'Échanges.

• Second moyen d'action : peser sur une mondialisation cohérente et à visage humain des programmes énergétiques

Dans les Pays Industrialisés - et pour nous, la France - nous sommes convaincus que notre Pays doit maintenir et perfectionner son potentiel nucléaire de fission, tant que le futur "Réacteur de fusion" ne sera pas opérationnel, à la condition d'améliorer encore les méthodes et techniques de retraitement et de stockage des déchets, dans une totale transparence (ce qui nous semble être le cas, contrairement à certaines positions passionnelles) et dans la perspective d'une **transformation prochaine de plus en plus efficace de déchets à vie longue en déchets à vie courte** (afin de compenser partiellement l'arrêt catastrophique de Super-Phénix).

Le maintien de ce potentiel - l'amélioration de ses performances en terme de puissance en mégawatts électriques (de 1 000 à 1 600), de réduction du taux d'actinides - ne doit pas, au contraire, nuire au développement des "Énergies renouvelables" pour lesquelles notre Pays accuse un retard significatif et doit relever un défi exigé par l'Opinion publique : éoliennes surtout, mais aussi piles à combustible. Des voies de perfectionnement existent : nouveaux catalyseurs pour les piles à combustible : profil des pales pour les éoliennes, et même, très récemment les hydroliennes : par immersion d'un système d'hélices dans la mer, à Milford Haven.

Les hydroliennes :

La "Loi de Betz" demeure valable, mais l'eau est 800 fois plus dense que l'air, de sorte que là où un aérogénérateur utilise une hélice de 40 mètres de rayon, 5 mètres suffisent pour un "Générateur Hydraulique à Marée". Avec 10 révolutions par minute l'énergie obtenue est supérieure de 50% à l'énergie éolienne.
[Expérience réalisée par Richard Ayre, en 1997, à St. Bride's Bay, Pembrokeshire].

Chaque ensemble d'hélices effectue une rotation de 180° en fonction du sens de la marée, afin d'obtenir une production continue d'énergie ; la performance réalisée, 1 mégawatt pour une seule "turbine", a conduit le gouvernement anglais à subventionner à hauteur de 2,23 millions de Livres la réalisation d'une unité de 5 turbines dans le "Bristol Channel". Des ingénieurs travaillent sur des dispositifs anticorrosion d'une part, d'autre part sur l'adjonction d'une "anode sacrifiée" parcourue par un courant faible, afin de protéger les vies animales et végétales.

Objectif de Richard Ayre : après validation de la technologie, superviser la construction d'une centrale de 1 000 MW ! *[Réf. a Surfing Energy : a new wave" in "Next sustainable Energy" (1998)].*

Nous avons donné cet exemple pour illustrer, une fois de plus, la possibilité de ruptures technologiques, susceptibles, à moyen terme, de **modifier la "donne" du "bouquet énergétique"** (ou mix-énergie)... Le Solaire ne saurait être oublié.

"Notre option", en résumé : "Énergie de fission à déchets réduits et contrôlés", "plus" "Énergies renouvelables à localisation claire (énergies déconcentrées ou liées au réseau)", "plus" "promotion volontariste de l'Énergie de fusion", "plus" "Economie concertée d'énergies", "plus" "Programme de recherche fondamentale et technologique engageant de nombreux jeunes scientifiques de tous Pays" correspond à un idéal réaliste de projet énergétique, tout au moins à l'horizon 2020 ou 2050 suivant le cas. Deux générations ! Est-ce trop pour un projet politique vraiment responsable, au-delà des échéances électorales ? ! ...

Les "Énergies fossiles", notamment pétrole et gaz actuellement incontournables, devront leur "permanence éthique" à de drastiques réductions (de CO_2, SO_2, et NO_x, pour le pétrole, de CO_2 et NO_2 pour le gaz naturel) et à un engagement dans la réalisation d'autres voies énergétiques, à l'exemple de "Gaz de France" et "E.D.F." pour les piles à combustible.

La cogénération, à chaque fois que cela est possible, répond à une **éthique de responsabilité** : **économie d'énergie, réduction d'émission de gaz polluants** : L'exemple de Trelleborg-Industrie en trigénération est significatif.

La figure 55 en page suivante illustre pour le charbon en noir haut, le pétrole (trait médian), le gaz (en bas), l'évolution des taux de pollution quand on passe d'un système classique (trait fin) à la cogénération (trait fort).

Respect de la Nature : condition de Respect de l'Humanité

Définition de la biodiversité (contraction de "diversitébiologique") :

La biodiversité embrasse trois aspects différents mais reliés entre eux :

- La diversité des espèces,
- La diversité des écosystèmes,
- La diversité génétique

Un très récent article de la revue Nature *(Nature. Vol. 427. 8 janvier 2004. www.nature.com/nature)* insiste sur les risques d'extinction liés au changement de climat. Les chercheurs de quatorze laboratoires internationaux indépendants présentent leur estimation. Nous citons quelques extraits de cet article, ainsi que le tableau résumé.

Liste des auteurs :

Chris D. Thomas - Alison Cameron Rhys E. Green - Michel Bakkenes
Linda J. Baumont - Yvonne C. Collingham - Barend F. N. Erasmus Marinez Ferreira de Siqueira
Alan Granger - Lee Hannah
Lesley Hughes - Brian Huntley
Albert S. van Jaarsveld
Guy F. Midgley - Lera Miles
Miguel A. Ortega-Huerta
A. Townsend Peterson
Oliver L. Phillips
et Stephen E. Williams

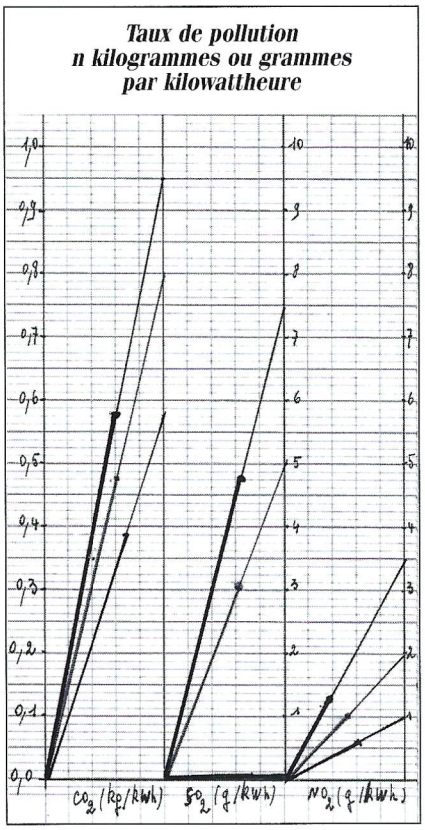


Figure 55 - Graphique de G. Fauny, d'après H. Nifenecker. Bulletin de la S.F.P. Loc. cit

"Nous explorons trois méthodes d'estimation de l'extinction basées sur la relation espèces-superficie de l'écosystème correspondant, qui est une relation empirique bien établie, décrivant comment le nombre d'espèces est dépendant du domaine ($S = cA^z$, où S représente le nombre d'espèces, A est la superficie de l'écosystème ; c et z sont des constantes). Cette relation prévoit d'une manière adéquate les nombres d'espèces qui disparaissent ou sont en péril lorsque leur biotope disponible se réduit par la destruction de l'habitat. Les extinctions causées par les réductions de biotope devraient s'appliquer quelle que soit la cause de perte d'habitat : destruction ou instabilité climatique.

Nous utilisons le paramètre $z = 0,25$ dans la relation générale espèces-surface du biotope, étant donné son succès précédent dans la prédiction des espèces menacées. Mais nos conclusions qualitatives ne dépendent pas du choix de z.

De cette étude, les auteurs déduisent que l'effet de serre, et l'augmentation de température consécutive (de 0,8 à 2°C) à l'horizon 2050 pourrait provoquer la disparition de plus de 2 espèces végétales ou animales par heure (dans les cinquante ans qui viennent).

Il est vrai que ce travail, publié par une revue très sérieuse, ne prend pas en compte les éventuelles capacités d'adaptation, "la résilience" de certaines espèces lorsque leur écosystème se trouve perturbé.

Cette publication fondée sur une analyse de l'évolution des écosystèmes, ne manquera pas de faire débat dans la communauté scientifique, même si les auteurs visent essentiellement des ordres de grandeur.

Extinction éventuelle estimée basée sur la perte d'habitat

Biotope	Pourcentage de perte	Pourcentage des surfaces par rapport à la surface mondiale 1990	Pourcentage de perte de biotope	Pourcentage d'extinction d'espèces prévisible en fonction de l'approche z = 0,25
Terre cultivée	0,00	10,9	0,0	0,0
Pâturage	0,00	23,1	0,0	0,0
Glace	1,7	1,7	0,0	0,0
Toundra	4.,8	4,6	0,2	1,0
Toundra boisée	2,0	1,9	0,1	1,1
Forêt boréale	13,0	12,5	0,5	0,9
Forêt de conifères relativement froide	2,7	2,1	0,6	6,1
Forêt tempérée mixte	5,2	2,2	3,0	19,2
Forêt tempérée arbres à feuilles caduques	4,5	1,5	3,0	24,2
Forêt mixte chaude	4,7	1,9	2,8	20,3
Prairie/steppe	13,7	6,9	6,8	15,7
Désert tropical	14,9	11,8	3,1	5,6
Maquis	7,3	1,9	5,4	28,9
Savane	11,9	6,2	5,7	15,1
Zone boisée tropicale	6,1	4,4	1,7	8,0
Forêt tropicale	7,6	6,4	1,1	4,0

La biodiversité marine affronte les mêmes risques :

"Au-delà d'un seuil de 11,5 à 12°C, le saumon femelle refuse d'abandonner ses gamètes" [Eddy Beall, Chercheur à l'INRA, cité sur la Revue "Le Monde 2" du 1er- 2 février 2004]..."

La femelle attend : un délai de 8 à 10 jours entraîne un risque de vieillissement des gamètes... *"Au-delà de cette période, nous avons remarqué que les œufs sont de moins bonne qualité : d'où les risques de malformations et des chances de survie réduites" (E. Beall)*

...L'INRA étudie l'adaptabilité du saumon face au réchauffement.

Dans un autre domaine, la décroissance de la couche d'ozone due au CFC, gaz utilisé dans les aérosols et les réfrigérateurs, (aujourd'hui interdit) est concomitante avec l'augmentation de radiations ultraviolettes, lesquelles provoquent un effet de réchauffement du phytoplancton, base de la chaîne alimentaire océanique.

Le réchauffement n'est pas la seule cause perturbatrice de la biodiversité : l'ensemble des activités humaines pèsent sur le monde animal et végétal : Pollutions variées, déforestation, agriculture et **pêches intensives**, extraction minière... trafics d'animaux, mouvements incontrôlés de populations animales (rats...).

Mais l'effet de serre vient amplifier la dégradation sur Terre et sur Mer de la biodiversité et blesser gravement "Dame Nature" chantée par le Poverello d'Assise.

Références

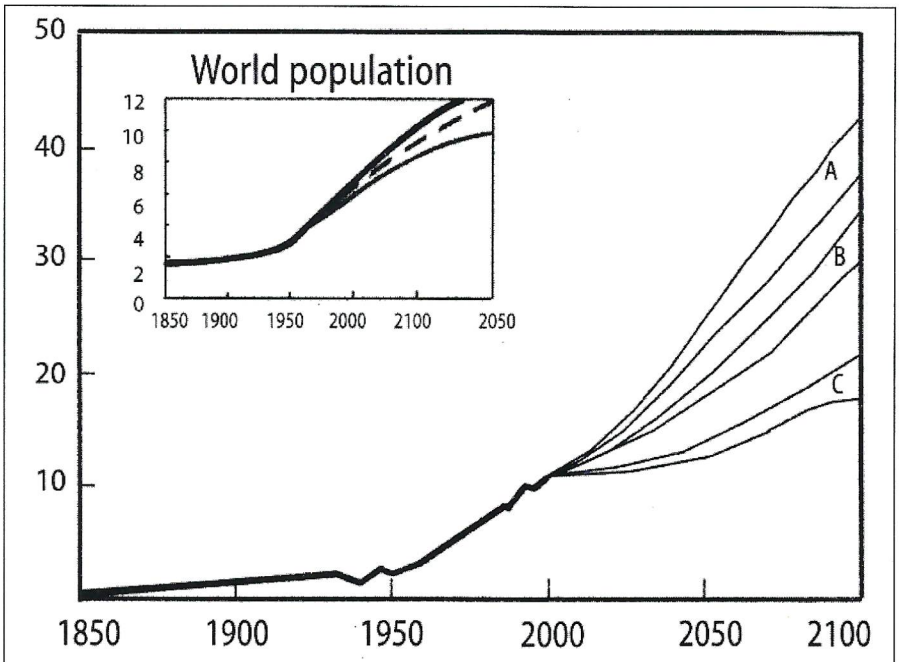
"The Diversity of Live". E.O. Wilson (Harvard University Press, 1992.

"Global Biodiversity : Status of the Earth's Living Resources - //.www.iucn.org.www.climatehopp-map.org."
(Nature N°427. 8 janvier 2004)

• Pour les Pays en Voie de Développement, l'urgence de l'extension des énergies renouvelables, hydraulique comprise, est évidente, avec une priorité pour le développement du solaire et des piles à combustible.

Rappel

1 panneau photovoltaïque de 3 kW = "une cuisinière" plus "un éclairage minimum" plus "un réfrigérateur" (avec accumulateur ou pile à combustible + un onduleur ; cf. Expérience de Portel des Corbières).



Consommation modiale annuelle en GTEP.

A : consommation intensive
B : doublement
C : exigence écologique sévère

Figure 56

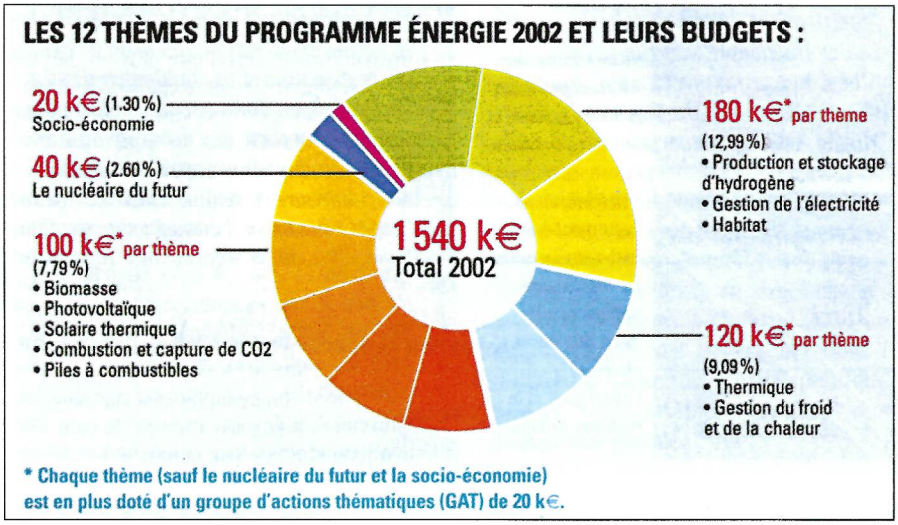


Figure 56
Réflexion "Recherches essentielles". Budget modeste. L.A.

Conclusion

• "Une des grandes leçons de l'écologie est que la plus petite des espèces vivantes, en vertu même de son existence, prouve qu'elle peut trouver sa "niche écologique". **Chacun d'entre nous, du plus humble au plus puissant**, a les moyens d'exercer son influence sur l'environnement"
[Michel Rostagnat in "Ethique et Développement" I.T.A. 17 mai 2002]

• **L'objectif final ?**

"Assurer une gestion responsable des ressources (matérielles, énergétiques, intellectuelles...) de la planète, de manière à sauvegarder les intérêts des générations futures, tout en répondant aux besoins des générations actuelles"
[Gro Harlem Brundtland. 1988.]

Nous ajouterons pour compléter : **"tout en respectant l'intégrité de la Création"**.

Cette conclusion ne prétend pas clore le débat :
"Il y a de la vérité ailleurs que chez soi"
[Paul Ricœur].



Association pour le Développement de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne

Présente

CD-ROM "REGARDS DE PHYSICIENS"

REGARDS DE PHYSICIENS c'est un document dont les auteurs sont des professeurs de physique (Louis Avan, Gérard Cohen-Solal, Alain Coulombeau, Hubert Gié, Roland Jouanisson, Robert Parreins, Roger Vessière) qui vous font partager leur passion, pour leur spécialité .

Contenu du CD-ROM complet :
Première partie : 53 pages, 41 images, 161 animations
Deuxième partie : 405 pages, 205 images

Coproduction :
*⇨ **CODIGE** : Conférence des Directeurs des grandes écoles d'ingénieurs et de gestion du Languedoc-Roussillon*
*⇨ **ADASTA** :Association pour le Développement de l'Animation Scientifique et Technique en Auvergne*

PREMIÈRE PARTIE

- **L'atome**
- **La molécule La matière**
- **Le chaud et le froid**
- **Le système solaire**
- **La foudre**
- **La lumière**
- **La musique et le bruit**

DEUXIÈME PARTIE
PERSPECTIVES DE LA SCIENCE :

TABLE DES MATIÈRES :

N. Nouveau temps des fondations : Cosmos 1
I. Fission nucléaire : Gloires et tragédies
II. «L'énergie nucléaire propre de l'avenir»
III. Géochronologie nucléaire
IV. Cosmos 2
Iconographies
V. L'univers en laboratoire ?
Iconographie
VI. Piles et accumulateurs
VI bis. Supracondutibilité
VII. Pour une « Éthique et esthétique »
VIII. L'univers nouvelle caverne de PLATON

Le Cd-rom Regards de Physiciens concerne un public d'étudiants de bac à bac +4, ingénieurs, enseignants et toutes personnes intéressées par la culture scientifique et les retombées de la Science.

Reproduction interdite

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel ..... 30€
Adhésions à titre collectif ..... 80€

L'adhésion donne droit à la revue Auvergne-Sciences, à des réductions sur les locations et les achats, à des invitations aux conférences et aux visites d'entreprises (une participation aux frais peut être demandée lors de certaines visites).

Permanences : Lundi : 14 h - 18 h / Mardi : 8 h- 12 h - 14 h - 17 h / Mercredi : 8 h- 12 h -14 h - 18 h
Jeudi :8 h- 12 h 14 h - 17 h / Vendredi : 8 h- 12 h

Adressez le courrier à :
ADASTA - Centre Richelieu - 13, rue Richelieu - 63400 Chamalières - Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04
E-mail : adasta@wanadoo.fr - Site internet : http://perso.wanadoo.fr/adasta

Dépôt légal septembre 2003 - N° ISSN - 1166-5904

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Président *: Paul Avan - Rédactrice en chef : Jocelyne Allée*
Membres *: Jean-Claude Capelani, Luc Dettwiller, Paul-Louis Hennequin, Roland Jouanisson, Michel Naranjo, Bernard Ragout.*

Photos de couverture : Centrale Nucléaire de Civeaux (Photo Framatome ANP - Claude Pauquet), Eolienne de Château-Lastours (Portel des Corbières) - Norias sur l'Oronte à Hama, Syrie (cliché U. Vidali) - Moulin à vent, Bruges (cliché F. Jaudot) - The Cutty Sark, Diploma Collection of the Royal Society of Marine Artists - Hubble space telescope (cliché NASA/ESA), La Terre (Cliché NASA), l'enfant (cliché ADASTA), Montage : H. Berthelier (ADASTA) - Impression : Imprimerie Porçu - Clermont-Ferrand

© Toute reproduction partielle ou totale interdite.

