

DPh - PFC - DIR

EUR - CEA - FC - 758

ETUDE PROSPECTIVE
SUR L'ENERGIE

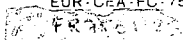
D. BRETON

Ma: 1974

CEA
UL
R
A
T
O
M

DPh-PFC-DIR

EUR-CEA-FC-758



ETUDE PROSPECTIVE
SUR L'ENERGIE

D. BRETON

Mai 1974

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE I - GENERALITES SUR L'ENERGIE.

PAGE

	INTRODUCTION
13	I.1 - LE CYCLE DE L'ENERGIE DANS L'UNIVERS
15	I.2 - LE CYCLE ENERGETIQUE DE LA TERRE.
17	I.3 - EVALUATION DES RESERVES D'ENERGIE D'ORIGINE FOSSILE DANS LE
	MONDE
18	I.3.1 - Unités
19	I.3.2 - Les réserves de charbon
20	I.3.3 - Les pays producteurs de charbon
21	I.3.4 - Les réserves de pétrole
22	I.3.5 - Les principaux pays producteurs de pétrole en 1972.
23	I.3.6 - Les réserves de gaz naturel.
25	I.3.7 - Les principaux pays producteurs de gaz naturel
	en 1972.
2	I.3.8 - Recapitulation des besoins et des réserves.
27	I.4 - L'EVOLUTION DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE
27	I.4.1 - Généralité.
30	I.4.2 - L'évolution de la demande
30	I.4.2.1 - L'évolution de la demande mondiale
	d'énergie d'origine fossile au cours
	des dernières années. Prévisions à
	long terme.
35	I.4.2.2 - L'évolution de la demande dans l'Europe
	des 6.

PAGE

37	1.4.3 - La structure de la demande d'énergie.
38	1.4.3.1 - Coefficient d'équivalence et efficacité relative des différentes formes d'énergie.
40	1.4.3.2 - Approches pour déterminer l'efficacité relative des différentes formes d'énergie.
40	1.4.3.2.1 - Efficacité relative de l'énergie .
41	1.4.3.2.2 - Les difficultés d'une mesure directe de l'efficacité relative des différentes formes d'énergie.
42	1.4.3.2.3 - Conséquences possibles pour les prévisions de consommation.
44	1.4.4 - Esquisse d'un bilan énergétique français pour l'an 2000.
48	1.5 - LE CYCLE DE L'ENERGIE DANS LA SOCIETE INDUSTRIELLE
51	1.6 - RENDEMENT ENERGETIQUE.
57	1.7 - LE ROLE DU PETROLE A COURT ET MDYEN TERME.

60. CHAPITRE II - LA CRISE PETROLIERE

61	II.1 - GEOPOLITIQUE DE L'ENERGIE FOSSILE (CHARBON PETROLE)
61	II.1.1 - Le charbon
63	II.1.2 - Le pétrole
64	II.2 - L'EVOLUTION DU MARCHÉ DU PETROLE AU COURS DES DERNIERES ANNEES
64	II.2.1 - Jusqu'en 1950.
64	II.2.2 - A partir de 1950.

PAGE

65	II.3 - LA CRISE PETROLIERE
66	II.3.1 - Les raisons principales de la crise petrolière.
68	II.3.2 - Quelques conséquences de la crise pétrolière.
74	II.4 - LE G Z NATUREL.
77	<u>CHAPITRE III - LES ENERGIES NOUVELLES (AUTRES QUE NUCLEAIRE)</u>
78	III.1 - L'ENERGIE DES MERS.
78	III.2.1 - L'énergie thermique des mers.
79	III.1.2 - L'énergie marémotrice.
81	III.2 - L'ENERGIE EOLIENNE
82	III.3 - L'ENERGIE SOLAIRE.
85	III.4 - LES ENERGIES DE LA TERRE.
85	III.4.1 - L'énergie géothermique
87	III.4.2 - L'énergie de géopression
89	III.5 - L'EMPLOI DE L'HYDROGENE.
91	III.6 - LES PILES A COMBUSTIBLE.
93	III.7 - LA CONVERSION MAGNETOHYDRODYNAMIQUE ET THERMOIONIQUE
94.	III.7 - LE STOCKAGE DES ENERGIES.
96	<u>CHAPITRE IV - LA POLITIQUE ENERGETIQUE AMERICAINE DANS LES ANNEES 1975 - 1980.</u>
96	IV.1 - LE RAPPORT DU PRESIDENT NIXON
102	IV.2 - COMMENTAIRES RELATIFS AU PROGRAMME AMERICAIN 1975-1980.
106	IV.3 - EXAMEN DES DIVERS OBJECTIFS DU PROGRAMME.
108	IV .3.1 - Objectif a

115	IV .3.2 - Objectif b
115	IV. 3.3 - Objectif c
115	IV. 3.4 - Objectif d
115	IV. 3.5 - Objectif e
117	IV. 3.6 - Programme de soutien
112	IV.4 - TABLEAU RECAPITULATIF DU FINANCEMENT DU PROGRAMME AMERICAIN
115	IV.5 - QUELQUES CONCLUSIONS RELATIVES AU PROGRAMME AMERICAIN.

123 CHAPITRE V - L'ENERGIE NUCLFAIRE (FISSION)

124	V.1 - INTRODUCTION
125	V.2 - RAPPEL DE PRINCIPE
129	V.3 - QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR.
130	V.4 - LES DIFFERENTES FILIERES.
130	V.4.1 - Les filières utilisant de l'uranium naturel
135	V.4.1.1 - Les réacteurs à uranium naturel et au graphite refroidis au gaz.
137	V.4.1.2 - Les réacteurs à uranium naturel utilisant de l'eau lourde.
138	V.4.2 - Les filières utilisant de l'uranium enrichi.
142	V.4.3 - Les autres filières.
143	V.4.3.1 - Les réacteurs homogènes
144	V.4.3.2 - Les réacteurs à hautes températures.
147	V.4.3.3 - Les réacteurs à neutrons rapides.

PAGE

152	V.5 - LES PROBLEMES DE SURETE ASSOCIES A L'ENERGIE NUCLEAIRE.
153	V.5.1 - Les problèmes de sûreté dans les réacteurs nucléaires.
153	V.5.1.1 - Les risques d'explosion nucléaire.
155	V.5.1.2 - Les risques de libération de produits radioactifs
156	V.5.2 - Les problèmes de sûreté dans les usines de retraitements et les transports.
157	V.5.3 - Le stockage des résidus radioactifs.
161	V.5.4 - Conclusion
164	V.5.5 - Organisation de la sûreté.
165	V.6 - LA SEPARATION ISOTOPIQUE
169	V.7 - LES RESSOURCES MONDIALES EN URANIUM
172	V.7.1 - Equilibre des ressources et des besoins mondiaux jusqu'en 1985
175	V.7.2 - Besoins français à long terme en uranium selon divers hypothèses de développement nucléaire.
179	V.8 - LA POSITION DE L'URSS CONCERNANT LE DEVELOPEMENT DE L'ENERGIE NUCLEAIRE.

182 CHAPITRE VI - L'ENERGIE THERMONUCLEAIRE (FUSION)

183	VI.1 - INTRODUCTION
184	VI.2 - RAPPEL DE PRINCIPE
186	VI.3 - CONFINEMENT MAGNETIQUE.
186	VI.3.1 - Principe
187	VI.3.2 - Ou en est-on ?
189	VI.3.3 - Les objectifs à atteindre, les performances actuelles, les étapes.

PAGE

134	VI.4 - LA MICROEXPLOSION THERMONUCLEAIRE.
134	VI.4.1 - Principe
135	VI.4.2 - Ou en est-on
136	VI.4.3 - La production d'énergie.
137	VI.5 - ENERGIE DE FISSION - ENERGIE DE FUSION .
138	VI.6 - PERSPECTIVE DE L'ENERGIE DE FUSION
138	VI.7 - INTERETS DE L'ENERGIE DE FUSION.
139	<u>CHAPITRE VII - CONCLUSIONS ET TENTATIVES DE PERSPECTIVES</u>
141	TABLE DES MATIERES
141	BIBLIOGRAPHIE.

- I N T R O D U C T I O N -

La croissance économique s'accompagne d'un accroissement de la demande énergétique. La poursuite de cette croissance s'est maintenue à un rythme élevée au cours des 20 dernières années, de sorte que la demande énergétique mondiale a cru régulièrement lors de cette période au rythme de 5 % par an. Un tel rythme ne pouvait pas se maintenir sans qu'apparaissent des limites ; la crise pétrolière était prévue depuis longtemps, certains l'annonçaient pour 1980, d'autres pour 1985, tous les pronostics ont été déjoué, elle a éclatée en 1973, avec d'autant plus d'impact que les pays industrialisés ne l'attendaient pas si tôt.

Après la dernière guerre mondiale, ces pays ont en effet fondé leur développement industriel sur une énergie à bon marché : le pétrole dont la production et les prix étaient contrôlés par de grandes compagnies multinationales. L'abondance et la facilité d'exploitation des gisements pétroliers du Moyen Orient a progressivement éliminé le charbon qui n'a pas résisté (en particulier en France) à la compétitivité économique du pétrole .

Les réserves de combustibles fossiles sont encore importantes mais leur exploitation ne peut plus se faire dans les mêmes conditions que celles qui ont eu cours jusqu'à nos jours. La facilité d'exploitation pétrolière est terminée. Les nouveaux gisements (en particulier les gisements sous-marins) seront plus coûteux à exploiter. Quant au charbon les gisements américains et

russes sont énormes mais si l'on ne veut pas remettre en question toute la structure industrielle de l'occident il faut le gazéifier ou le liquéfier pour l'utiliser dans les installations industrielles actuelles. Ces techniques de liquéfaction ou de gazeification ne sont pas encore au point industriellement, elles seront en outre coûteuses et nécessiteront des installations très importantes. De sorte que le cout de l'énergie fossile ne peut que continuer à s'élever dans le proche avenir.

D'autres sources d'énergie sont possibles, elles sont examinées succinctement dans un chapitre de ce document, mais aucune n'est capable à court terme de produire des quantités massives d'énergie dont ont besoin les sociétés industrielles ; la plus abondante d'entre elles, l'énergie solaire peut sans doute à terme constituer un appoint énergétique important mais on ne voit pas actuellement comment il serait possible, sans abandonner toutes les structures industrielles existantes de produire d'importantes quantités d'énergie de façon continue.

L'énergie nucléaire, née au cours de la "dernière guerre" avait dès 1960 atteint un niveau de compétitivité économique qui lui avait permis de rivaliser avec le pétrole. L'arrivée massive du gaz naturel à cette époque a retardé cette percée technologique. Le renchérissement des combustibles fossiles rend maintenant possible l'énergie nucléaire ; c'est en outre la seule source d'énergie qui puisse satisfaire des demandes importantes sans pour autant bouleverser toute la technologie existante ; (les centrales électriques conservent la même technologie seules les chaudières

à fuel ou à charbon sont remplacées par des chaudières nucléaires). L'énergie nucléaire, ne peut pas se substituer à tous les usages des combustibles fossiles. Il serait donc judicieux de procéder à une sélection des objectifs industriels afin de conserver le fuel pour des usages spécifiques (petrochimie, transport). Les USA se sont lancés depuis quelques années dans l'énergie nucléaire, ils ont réussi à imposer leur technologie dans tout le monde occidental. Dès maintenant, des commandes très importantes représentant un investissement de plusieurs centaines de millions de \$ sont en cours d'exécution au USA où de nombreuses centrales nucléaires sont déjà en exploitation. Après avoir tenté de développer une technologie spécifique (réacteurs graphite gaz) la France et l'Angleterre ont récemment adopté la technologie des centrales américaines utilisant de l'uranium et de l'eau ordinaire. Ce choix a été complété par la décision de construire une première usine de séparation isotopique en Europe (en France) afin de permettre d'alimenter les réacteurs en uranium enrichi. Ce développement nucléaire nécessite la mise en place d'un organisme neutre chargé de veiller au respect des normes de construction et d'exploitation des installations nucléaires. Ces organismes devront gagner la confiance du public, qui manifeste encore beaucoup de réticence devant des dangers qu'il perçoit mal ; les risques nucléaires sont très faibles si des conditions rigoureuses d'exploitation sont respectées (il conviendrait sans doute de développer la collaboration du public et de dispenser les informations, sous des formes adéquates pour permettre de développer les connaissances dans un domaine qui est jusqu'à présent resté entre les mains des spécialistes). Le risque principal du développement de l'énergie nucléaire sur une

grande échelle concerne la pollution thermique (mais ce risque est loin d'être inexistant pour les centrales à combustible fossile). Il prend, dans le cas du nucléaire une importance particulière par suite du choix de la filière à uranium légèrement enrichi et eau ordinaire, il diminuera notablement lorsque la technologie permettra le développement des centrales nucléaires utilisant les neutrons rapides. Ces réacteurs produisent de l'énergie avec un rendement thermodynamique largement supérieur à celui des centrales à combustible fossile, en outre, ils reproduisent une partie importante du combustible qu'ils consomment. Il semble qu'il faille s'attendre à une percée technologique de ces réacteurs vers les années 1985. Les ressources mondiales connues en uranium permettent de développer l'énergie nucléaire sans crainte de pénurie de combustible à moyen terme. Il est toutefois évident qu'il faudra faire un effort de prospection important pour faire face aux besoins prévisibles. On peut être à ce sujet raisonnablement optimiste car la prospection de l'uranium ne fait que commencer, des moyens techniques de prospection peuvent encore se développer notablement, enfin la répartition de l'uranium dans le monde n'est pas localisée comme le sont les gisements de combustibles fossiles dont la présence est très liée aux couches sédimentaires; (le prix de l'uranium au cours actuel entre dans une faible part dans le prix de l'énergie produite). La France contrôle actuellement 10% de la production mondiale d'uranium alors que ces besoins ne représente jusqu'à la fin du siècle que 6 % ; certains gisements métropolitains ont une indéniable valeur stratégique, enfin, à la différence du pétrole, l'uranium est très facilement stockable.

Ulterieurement, vers la fin de ce siècle, il est probable que la fusion thermonucléaire aura atteint le stade industriel; il faut s'attendre à ce que la démonstration de faisabilité principes soit faite dans 5 années à venir. Ces réacteurs présentent des avantages importants; il ne consomme que du deutérium (isotope de l'hydrogène que l'on trouve dans l'eau ordinaire à raison de une partie pour 5000) et ne produisent pas de résidus radioactifs comme il s'en trouve dans les résidus de la fission. Le combustible ne présente aucune difficulté d'approvisionnement, et l'extraction ne pose pas de difficultés technologiques ou économiques ou écologiques particulières.

Il apparaît ainsi, que s'il y a pénurie pétrolière actuellement, le destin énergétique de l'humanité est assuré à long terme sur le plan technologique, à elle de s'organiser socialement et écologiquement pour en tirer le meilleur parti possible aussi, bien dans les pays très fortement industrialisés que dans ceux qui ne le sont pas encore.

CHAPITRE I
- - - - -

GENERALITES SUR L'ENERGIE.

I.1 - LE CYCLE D'ENERGIE DANS L'UNIVERS

L'objet de ce paragraphe est de donner un aperçu de l'évolution des flux d'énergie existant dans l'univers tel que nous l'appréhendons aujourd'hui. La genèse des différentes formes d'énergie observées sur terre ou dans l'univers en général et l'étude même sommaire des divers processus de transformation énergétiques permettent de préciser certains aspects des problèmes auxquels l'humanité risque de se trouver un jour confronter. Sans une certaine mesure, ce que nous pourrions faire sur notre planète est à la limite soumis aux mêmes lois physiques que celles qui gouvernent l'économie des sources d'énergies du monde astronomique. La différence fondamentale entre la destinée énergétique de la terre et celle des autres astres ou planètes est, pour autant que nous le sachions, que nulle part ailleurs n'intervient une volonté humaine orientant l'utilisation et l'épuisement des ressources énergétiques vers une finalité consciente d'ailleurs difficile à définir avec précision. La société actuelle a pris conscience que l'activité industrielle humaine risque, (dans un avenir à brève échéance selon les uns, à long terme selon d'autres) à la fois d'épuiser rapidement des ressources énergétiques rares et de modifier de surcroît certains équilibres fragiles, en particulier, ceux relevant du domaine biologique. Cette prise de conscience constitue un évènement psychologique et social de grande importance

L'énergie contenue dans l'univers existe principalement sous forme gravitationnelle, calorifique, lumineuse ou nucléaire ; l'énergie chimique qui constitue la source principale des activités humaines forme une infime partie de l'énergie contenue dans l'univers ; l'énergie gravitationnelle étant largement prédominante. Les lois de la thermodynamique caractérisent les différentes formes d'énergie par une fonction d'état appelée entropie qui mesure le degré de "désordre" associée à cette énergie. Selon le second principe de la thermodynamique les transformations énergétiques évoluent dans un jeu tel, que leurs entropies s'accroissent de sorte que les transformations énergétiques sont caractérisées essentiellement par l'irréversibilité. L'énergie gravitationnelle est non seulement l'énergie prédominante dans l'univers, mais c'est également celle dont la qualité est la plus élevée car son entropie est nulle. (C'est pour cette raison qu'une centrale hydroélectrique convertissant l'énergie gravitationnelle de l'eau en énergie électrique peut avoir une efficacité voisine de 100 %). Dans l'univers, le flux principal de transformation de l'énergie est constitué par la contraction gravitationnelle de la matière au cours de laquelle l'énergie gravitationnelle est transformée en énergie cinétique, en énergie lumineuse et en chaleur. Cette dégradation constante de l'énergie se poursuit sans cesse mais certaines étapes ont des durées beaucoup plus longues que les autres.

En premier lieu la densité de la matière dans l'univers est très faible en outre ce dernier est tellement étendu que la contraction de la matière s'étend sur une période de temps très grande compte tenu de notre échelle de temps humain ; (à peu près

100 milliards d'années si on ne prend en compte que l'univers visible et 100 millions d'années pour notre galaxie) ; en outre au cours de la contraction, certains phénomènes hydrodynamiques apparaissent et retardent la dégradation entropique de l'énergie ; par exemple une masse de matière importante ne peut pas se contracter facilement si elle est animée d'un mouvement de rotation (à cause de la force centrifuge), c'est le cas de notre galaxie et de notre planète (la rotation de la terre sur elle-même leur évite une contraction trop rapide qui leur serait fatale), mais aucun de ces processus n'est stable et l'énergie se dégrade progressivement. Le système solaire semblait aux premiers astronomes une "machine" animée d'un mouvement perpétuel parfait mais en réalité sa longévité dépend des actions provenant de la combinaison des effets gravitationnels de la matière et des mouvements de rotation de celle-ci soit sur elle-même soit sur une orbite.

Un autre phénomène intervient, lors de la contraction de l'hydrogène qui est comme on le sait le constituant principal de notre univers ; des réactions thermonucléaires peuvent apparaître lorsque l'hydrogène est suffisamment chauffée et comprimée. Ces réactions dégagent des quantités d'énergie s'opposant à la contraction de la matière augmentant ainsi la longévité de certaines étoiles comme soleil par exemple. La combustion de l'hydrogène retarde la reprise de la contraction de la matière, c'est au cours de la phase ultime de contraction, que les divers éléments chimiques sont créés, (de façon irréversible d'ailleurs puisque la combustion de l'hydrogène peut conduire à la production de carbone et de fer par exemple ; inverse n'est pas vrai) : ces élé-

ments ne sont pas tous stables certains sont radioactifs et se désintègrent rapidement; d'autres capturent des neutrons *changeant de nature et forment par captures neutroniques successives les* 92 éléments existant ;d'autres sont spontanément fissiles et donnent naissance à des noyaux plus légers. L'achèvement de la phase finale de contraction donne naissance à des phénomènes violents dont nous *re venons de prendre conscience que récemment*

Le tableau ci-joint met en évidence la dégradation de l'énergie au cours de l'évolution de l'univers et du soleil en particulier. La terre recèle outre les différentes formes d'énergie gravitationnelle, calorifiques, lumineuse nucléaire qui viennent d'être évoquée, précédemment des combustibles chimiques telles que le charbon et le pétrole. On constate ainsi que l'entropie de l'énergie nucléaire est beaucoup plus faible que celle de l'énergie d'origine fossile (charbon, pétrole).

1.2 - LES CYCLES ENERGETIQUES DE LA TERRE

La source d'énergie prépondérante à la surface de la surface de la terre est d'origine solaire ; une faible fraction d'énergie provient de l'intérieur de la terre par suite de sa contraction et une fraction encore plus faible provient de l'énergie gravitationnelle due aux marées. A la surface de la terre les ordres de grandeur sont les suivants :

énergie solaire	- 1,4 Kwatt/m ² soit au total 1,73 10 ¹⁷ watts
énergie d'origine interne arrivant en surface par conduction convection	0,063 Watt/m ² . Soit au total 32 10 ¹² watt
Energie des marées	3 10 ¹² watt

TABEAU I (référence (1))

FORME D'ENERGIE	ENTROPIE PAR UNITE D'ENERGIE
Gravitation	0
énergie de rotation	0
énergie de mouvement orbitaux	0
réactions nucléaires	10^{-6}
chaleur interne des étoiles	10^{-3}
lumière solaire	1
réactions chimiques	1-10
chaleur terrestre perdue	10-100
radiation cosmique de courte longueur d'onde	10^{+4}

Ce tableau tente d'opérer une classification par ordre de mérite des différentes formes d'énergie rencontrées dans l'univers. L'entropie qui mesure le degré de désordre associé à certaine forme particulière de l'énergie varie approximativement comme l'inverse de la température associée à la forme d'énergie considérée. Dans le cas des énergies gravitationnelles de rotation ou d'origine orbitale, aucune notion de température n'est associée à ces formes d'énergie et leur entropie est nulle selon les théories physiques en vigueur. Les différentes formes sous lesquelles l'énergie apparaît, évoluent de telle façon que l'entropie s'accroît continuellement. Il apparaît ainsi que l'énergie nucléaire offre beaucoup plus de possibilités que l'énergie chimique qui constitue jusqu'à présent la majeure partie des ressources de l'humanité.

L'énergie solaire représente donc 99,98 % de l'énergie disponible naturellement à la surface de la terre. Environ 30 % soit $51 \cdot 10^{15}$ watts de l'énergie solaire incidente est réfléchi dans l'espace et diffusée sous forme de radiation de courte longueur d'onde, 48 % soit $81 \cdot 10^{15}$ watts sont absorbés par l'atmosphère terrestre et la surface de la terre pour être ensuite converti directement en chaleur à la température ambiante ; 23 % soit $40 \cdot 10^{15}$ watts sont utilisés par l'évaporation de l'eau la pluie et le cycle hydrologique. Une fraction très faible, équivalente à $0,37 \cdot 10^{15}$ watts est utilisée par les mouvements de convection de l'air, des vagues des océans et est dissipée en chaleur par friction ; finalement une fraction encore plus faible équivalente à $40 \cdot 10^{12}$ watts est capturé par la chlorophylle des feuilles des plantes et devient source d'énergie fournissant, par le processus de photosynthèse, les hydrates de carbone nécessaires au règne végétal et animal. Le tableau II illustre simplement le cycle de l'énergie sur la terre.

Une partie des végétaux et des animaux morts au cours de l'histoire de la terre se sont trouvés enfouis sous une forte épaisseur de sable de boue et de limons sédimentaires ; leur décomposition à l'abri de l'oxygène a donné naissance aux combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz). Ces derniers constituent aussi en quelque sorte un stockage d'énergie chimique d'origine solaire. Il a fallu environ 600 millions d'années pour constituer ces réserves de combustibles d'origine fossile. Il est probable que ce processus se continue de nos jours, mais le rythme d'extraction de ces combustibles depuis qu'une partie de la société humaine a atteint

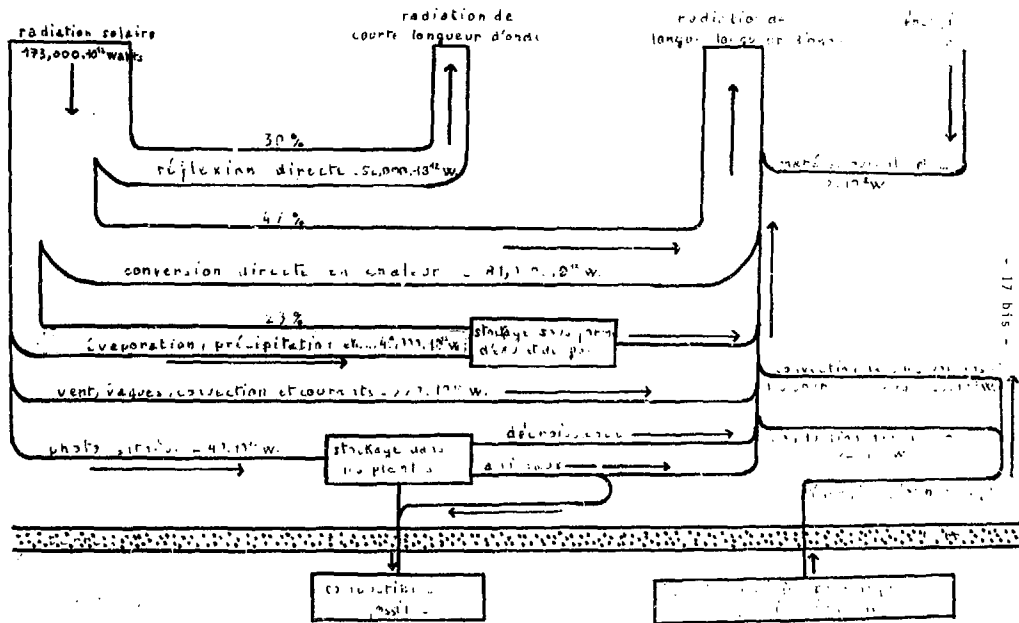


TABLEAU II

CYCLE DE L'ENERGIE SUR LA TERRE.

le stade industriel est sans commune mesure avec le rythme de production.

Ces rapports d'ordre de grandeur permettent de situer le problème de l'énergie dans son contexte. La société industrielle humaine n'utilise et ne met en oeuvre qu'une infime fraction de l'énergie reçue par la terre. Cette société utilise à un rythme très élevée des ressources énergétiques fossiles qui ont été constituées au cours de millions d'années et qui ne se reconstituent qu'à un rythme de production très inférieur au rythme de production très inférieur au rythme d'exploitation actuel. Il est évidemment tentant, après examen de ce tableau de rechercher des sources énergétiques d'autre nature que l'énergie fossile ; on verra dans les paragraphes suivants quelles sont les possibilités offertes par ces diverses sources d'énergie. On notera dès maintenant que ces énergies ne sont pas de très hautes qualité entropique (voir Tableau I).

I.3 - EVALUATIONS DES RESERVES D'ENERGIE D'ORIGINE FOSSILE DANS LE MONDE.

I.3.1- Unités

Afin de pouvoir comparer les réserves des divers combustibles entre eux, il faut définir une unité permettant d'effectuer des équivalences; pour les combustibles fossiles on utilise couramment la tcc tonne équivalent charbon, ou la tep tonne équivalent pétrole. On a approximativement :

1000 m³ de gaz naturel = 1 tonne équivalent pétrole, = 1 TEC

1 baril de pétrole = 1600 litres.

1000 kWh = 0,33 TEC.

Dans ce qui suit on utilisera couramment la TEC.

1.3.2 - Les réserves de charbon

Le tableau III donne une idée de grandeur des ressources mondiales de charbon et de leur répartition dans le monde. Ces réserves prouvées sont de l'ordre de 8600 milliards de tonnes : ce chiffre suppose un taux de récupération de 50 % des gisements carbonifères, c'est à dire qu'il en resterait après extraction industrielle (avec les techniques actuellement connues) environ autant, de plus elles sont limitées aux couches d'au moins 35 cm d'épaisseur situées à des profondeurs inférieures à 1200 mètres (1800 mètres pour quelques gisements exceptionnels). Ces réserves sont très importantes si on les compare aux chiffres relatifs à la consommation (7 milliards de tec en 1970 dont 2,5 milliards de tonnes de charbon soit 32 % du total).

TABLEAU III (Référence 2)

RESERVES MONDIALES DE CHARBON.

Régions	Réserves prouvées (milliards de tonnes)	Réserves probables mil- liard de tonnes	Total milliards de tonnes.
Amérique du Nord	1560	2520	4080
dont USA	1420	1490	2910
URSS	5900	2720	8620
Europe	56	190	750
Asie	450	910	1360
Afrique	70	150	220
Océanie	50	70	120
Amérique du Sud	20	10	30
Monde	8610	6570	15180

On constate que les réserves probables sont approximativement du même ordre de grandeur que les réserves prouvées.

1.3.3 - Les pays producteurs de charbon.

On trouvera ci-dessous la liste des onze premiers pays producteurs de charbon en 1970 classés par ordre de production décroissante :

1) USA	510	Millions de tonnes
2) URSS	485	
3) Chine	390	
4) Grande Bretagne	147	
5) Pologne	145	
6) Allemagne de l'Ouest	110	
7) Inde	74	
8) Afrique du Sud	59	
9) Australie	50	
10) Japon	33,4	
11) France	33	

Total mondial en 1970 = 2,5 milliards de tonnes dont 2 milliards pour les 10 premiers pays producteurs.

1.3.4 - Les réserves de pétrole

Face à ces importantes réserves de charbon celles d'hydrocarbure sont beaucoup plus modestes. En ce qui concerne le pétrole on peut estimer que les réserves prouvées sont les suivantes (référence 3).

1) Arabie Saoudique	20	milliards de tonnes
2) URSS (et satellites)	11	
3) Iran	9,3	
4) Kowett	9,3	
5) USA	5,2	
6) Lybie	4,3	

7) Irak	4,3 milliards de tonnes
8) Vénézuéla	2
9) Algérie	1,6
10) Indonésie	<u>1,5</u>
Total	68,3

Total mondial 90 milliards de tonnes de pétrole soit 145 milliards de TEC. (on notera que cette statistique ne mentionne pas la chine). D'après une statistique publiée par la "Standard oil Company of New Jersey" les réserves probables sont de l'ordre de 320 milliards de tonnes (une autre évaluation donne le chiffre de 220 milliards de tonnes) soit 480 milliards de TEC.

1.3.5 - les principaux pays producteurs de pétrole en 1972 en millions de tonnes (référence 3).

1. USA	532	11. Indonésie	54
2. URSS	394	12. Algérie	52
3. Arabie Saoudite	285	13. Abu Dhabi	50
4. Iran	254	14. Zone neutre	30
5. Vénézuéla	167	15. Chine	30
6. Koweït	152	16. Qatar	23
7. Libye	105	17. Mexique	23
8. Nigeria	89	18. Argentine	22
9. Canada	87	19. Australie	15
10. Irak	67	20. Roumanie	14

TOTAL.....

2445

Total Mondial 2,600 milliards de tonnes de pétrole soit
3,9 milliards de TEC.

On constate qu'en 1972, la consommation de pétrole a représenté environ 4 % des réserves prouvées. A ces réserves prouvées d'hydrocarbure il faut ajouter des réserves supplémentaires contenues dans les sables asphaltiques et les schistes bitumineux. Certains sables tels ceux de l'Alberta au Canada sont imprégnés d'huile qu'il est facile de récupérer les principaux gisements recensés concernent ceux du Canada environ 126 milliards de Tec,

du Venezuela environ 36 milliards de Tec,

de Madagascar environ 0,3 milliards de Tec.

Quand au schistes bitumineux, les réserves paraissent plus importantes encore ; dans ce domaine les chiffres sont incertains et les techniques de production encore mal connues. Une estimation en provenance de l'US geological survey donne pour l'ensemble du monde un chiffre de 500 milliards de tonnes de pétrole inclus dans les schistes bitumineux d'où l'on pourrait extraire 30 milliards de tonnes de pétrole consommable selon les processus d'extraction existant en 1970.

1.3.6 - Les réserves de gaz naturels

Les réserves mondiales de gaz naturel sont estimées en 1972 à environ 50 000 milliards de m³ répartis de la façon

suivante (référence 2)

TABLÉAU IV (réserves mondiales de gaz naturel)

Régions	Volumes en milliards de m ³ de gaz naturel	Répartition par pays	Volumes en milliards de m ³
Amérique	1200	{ USA Canada autres pays	7600 1500 2100
Afrique	5400	{ Algérie Nigeria Libie Autres pays	8000 1100 800 500
Moyen Orient	10000	{ Iran Arabie Saoudite Kowett Irak Autres pays	5700 1500 1000 600 1200
Europe occidentale	4600	{ Pays Bas Royaume uni France Autres pays	2350 1150 200 900
Extrême Orient	2000	{ Australie Pakistan Autres pays	700 500 800
Pays de l'est	16000	{ URSS Autres pays	15500 500
TOTAL	49200 Milliards de m ³ .		

Soit environ 50000 milliards de m^3 ce qui équivaut à 50 milliards de tonnes de pétrole soit 75 milliards de TEC (il s'agit de quantités prouvées et récupérables).

3.7 - Les principaux pays producteurs de gaz naturels en 1972.

1) USA	645 milliards de m^3
2) URSS	220
3) Canada	90
4) Pays Bas	58
5) Roumanie	26
6) Grande Bretagne	25
7) Mexique	18
8) Allemagne	18
9) Iran	16
10) Italie	<u>13</u>
	1130 milliards de m^3 .
France	7,5
Algérie	<u>3</u>
Total mondial	1140 milliards de m^3 .

Soit l'équivalent de 1,2 milliards de T de pétrole soit 1,8 milliards de TEC.

1.3.8 - Recapitulation

On peut rassembler dans un tableau les réserves et les productions de combustibles fossiles. (Exprimées en milliards de TEC (MTEC))

TABEAU V

Charbon		Pétrole		Gaz	
Réserves prouvées 1972 8610 MTEC	Production 1972 2,5 MTEC	Réserves prouvées 1972 145 MTEC	Production 1972 3,9 MTEC	Réserves 1972 75 MTEC	Production 1972 1,8 TEC
Production (72): $3 \cdot 10^{-4}$		Production: $2,710^{-2}$		Production (72): $2,410^{-2}$	
Réserve		Réserve		Réserve	

On en déduit : Production 1972 $\approx 10^{-3}$

Réserve totale de combustible fossile ;

ce qui signifie qu'en 1972 la consommation mondiale d'énergie a été égale au millième des réserves fossiles connues en d'autres termes le monde dispose en 1972 d'une réserve énergétique égale à 1000ans de consommations annuelle. Pourquoi alors parler de crise de l'énergie ? Pourquoi songer à utiliser d'autres sources d'énergie telles que l'énergie nucléaire ? La réponse à ces questions apparaîtra dans les paragraphes suivants.

1.4 - L'EVOLUTION DE LA CONSOMMATIONS ENERGETIQUE

1.4.1 - Généralités

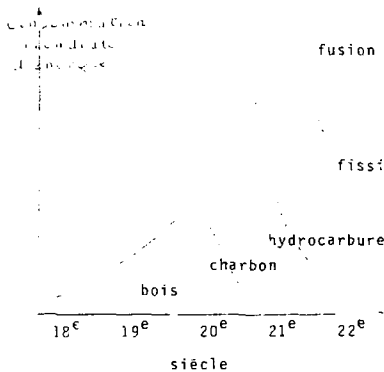
De tous temps des craintes ont été exprimées sur la possibilité pour l'humanité de disposer des matières premières minérales et de l'énergie dont elle a besoin pour assurer sa croissance. En fait, au cours des différentes périodes de son développement l'humanité a découvert et exploité au fur et à mesure de la progression de ses besoins diverses sources d'énergie de plus en plus importantes et dont l'utilisation a mis en oeuvre des techniques de plus en plus élaborées.

La force motrice produite à partir du vent et de l'écoulement des eaux a constitué une première étape ; mais le moulin est rapidement devenu insuffisant en raison du caractère aléatoire, non transportable et non accumulable de l'énergie produite.

L'exploitation de l'énergie solaire stockée pendant quelques dizaines d'années dans le bois grâce à la photosynthèse a constitué un progrès, mais ce dernier n'a pas suffi à satisfaire les besoins malgré le renouvellement permanent de cette ressource naturelle.

L'utilisation du charbon puis des hydrocarbure liquides a constitué une nouvelle étape enfin le gaz naturel est apparu. Nous sommes aujourd'hui dans l'ère du pétrole ; il y a évidemment des recouvrements de ces diverses époques car un combustible

ancien ne disparaît pas instantanément, de même un combustible nouveau n'apparaît que progressivement. Déjà les combustibles nucléaires font leur apparition, la fission commence à s'imposer comme ultérieurement la fusion le fera vraisemblablement de sorte que l'on s'accorde pour penser que les courbes de demandes énergétiques successives ont de grandes chances d'avoir l'allure repré-



sentée sur la figure ci-contre. En fait ceci correspond à une vue sans doute trop simple des phénomènes, car si la courbe de consommation du bois utilisé comme combustible l'allure représentée sur la figure ; il n'est pas évident qu'elle en sera de même pour le charbon qui peut reprendre le l'intérêt par rapport au pétrole si le prix de ce dernier s'élève abusivement.

Les craintes de pénurie sont motivées principalement par les raisons suivantes :

a) les ressources minérales ne se renouvellent pas et les réserves connues et exploitables ne représentent souvent que 20 à 30 années de consommation (sauf exceptionnellement pour le charbon). On en tire la conclusion peut-être hâtive que ces ressources seront définitivement épuisées dans un délai très court.

S'il est vrai que pour beaucoup de substances minérales les réserves connues ne couvriront que 15 à 20 ans de consommation cela tient en grande partie du fait que la prospection minière coûtant cher ce serait un gaspillage considérable de capitaux et d'énergie que d'avoir déjà prospecté des gisements qui ne seront exploités que dans 30 ans, 50 ans ou d'avantage. La prospection minière est en général le fait de sociétés privées ou étatiques dont l'horizon économique est au maximum de 20 à 30 ans.

b) L'exploitation de ces ressources a causé et cause encore des nuisances de diverses natures ; certains jugent ces nuisances intolérables et on tire la conclusion qu'une partie importante de ces ressources limitées ne pourra pas être exploitée ce qui rapproche encore l'échéance fatale de la pénurie définitive.

S'il y a bien menace de pénurie à terme elle ne se présente pas du tout comme on l'imagine couramment. L'urgence de faire face à la pénurie est nettement moindre que la nécessité de trouver aujourd'hui des solutions acceptables aux problèmes de la conversion des réserves d'énergie potentielles en travail ainsi qu'aux nuisances de tous ordres qui apparaissent lors de la production et l'emploi des combustibles. Tout dépend, en fait du taux de croissance économique, la production d'énergie qu'elle soit d'origine fossile ou fissile est très capitalistique, elle nécessite en outre une longue période de temps avant de devenir productive, il faut donc organiser la production et prévoir le mieux possible la demande en temps utile.

I.4.2 - L'évolution de la demande

I.4.2.1 - L'évolution de la demande mondiale d'énergie d'origine fossile au cours des dernières années - Prévisions à long terme.

De 1929 à 1871 la production mondiale de charbon a augmenté de 70 % et celle du pétrole de plus de 1000 %. Le déclin du charbon, principale source d'énergie en Europe jusqu'à la 2ème guerre Mondiale a entraîné une ascension rapide des hydrocarbures en particulier du pétrole comme source d'énergie des pays occidentaux. Le cas de la France est à cet égard exemplaire mais il n'est pas unique. Plus de 70 % des besoins énergétiques français étaient couverts en 1952 par le charbon. En 1971 la part du charbon était tombé à 23 % et il était prévu que son déclin se poursuivrait ; entre temps la part du pétrole de 22 % seulement en 1952 avait atteint le seuil de 70 %. Tous les pays européens et aussi le Japon dont l'économie est particulièrement dépendante du pétrole ont connu cette évolution. Seuls parmi les pays occidentaux les USA ont pu conserver jusqu'à ces dernières années un partage équitable entre le charbon, le gaz, le pétrole

Si l'on considère l'ensemble du monde non communiste on s'aperçoit, qu'en 1970 le pétrole brut représentait plus de la moitié de l'ensemble de l'énergie consommée. Si l'on ajoute à ce chiffre la part du gaz naturel, 19,5 % on arrive à 70 % pour l'ensemble des hydrocarbures.

A titre d'exemple, la consommation mondiale de charbon pendant les 110 dernières années a été 20 fois plus grande que pendant les 700 ans précédents. En d'autres termes la quantité de charbon produite et consommée depuis 1940 c'est à dire en 30 ans est égale à celle consommée depuis l'origine de l'humanité : 133 milliards de tonnes de charbon ont été consommés entre 1850 et 1970 ; avant 1850 environ 7 millions de tonnes furent utilisés.

Le pétrole et le gaz ne furent pas extraits en quantités significatives avant 1880, mais depuis cette date la consommation double tous les 10 ans, de sorte qu'entre 1880 et 1970 la consommation totale de produits pétroliers fut d'environ 250 milliards de barrils dont la moitié fut consommé entre 1880 et 1960 et l'autre moitié entre 1960 et 1970.

Ces chiffres fixent les ordres de grandeur dues au rythme de l'accroissement de la demande mondiale de l'énergie. Une telle croissance va-t-elle se poursuivre et dans quelles conditions comment pourra-t-on y faire face ?

Depuis le début du siècle le taux annuel d'accroissement de la demande d'énergie a varié ; régulier jusqu'en 1913 et égal à 3 à 3,5 %, il reflétait la rapide industrialisation de l'Occident et sa mécanisation ; il a varié fortement avec la période trouble des 2 guerres, se soldant par une valeur moyenne de 2 % par an entre 1913 et 1952 ; cette valeur moyenne masquant une très grande disparité entre les nations ; l'URSS par exemple a connu un développement exceptionnel avec 6,6 % par an. A partir de 1952-1953

c'est la cassure dont on commence seulement à mesurer les conséquences : l'économie mondiale entre dans une phase d'expansion sans précédent. La demande d'énergie croît d'environ 5 % par an correspondant à un taux de doublement tous les 15 ans. Si ce taux ne se ralentit pas la consommation d'énergie globale devrait être comprise entre 25 et 30 milliards de TEC en l'an 2000.

Pour illustrer la signification pratique de ce chiffre on a calculé la longueur du convoi de pétroliers de 350 000 t. qui devrait assurer chaque jour l'approvisionnement du monde en pétrole. Cette longueur serait de 60 km et le convoi serait constitué de 200 pétroliers environ ; même en admettant que la capacité des pétroliers soit accrue et atteigne 1 million de tonne le convoi journalier serait de l'ordre de 30 km. Une telle croissance conduit à des conditions qui paraissent d'une part irréalistes même en tenant compte d'une évolution technologique raisonnable, et d'autre part, semblent peu compatibles avec les ressources de pétrole actuellement connues et même celles qui seront vraisemblablement découvertes.

Le chiffre de 30 milliards de TEC en l'an 2000 peut paraître invraisemblable ; les chiffres sont très probablement contestables (surtout à la lueur des derniers événements pétroliers) mais les ordres de grandeur sont vraisemblables. On peut en effet penser que :

1) la croissance démographique est un phénomène dont les tendances ne peuvent se retourner du jour au lendemain (sauf conflit mondial ou catalyseur très important) aussi la population mondiale en 1985 et même vers l'an 2000 peut-être estimée avec une bonne précision. Elle croît à peu près au rythme de 2% par an. Les hypothèses de croissance démographique sont mentionnées sur le tableau VI.

2) les besoins en énergie sont liés à la croissance économique ; il n'est pas impossible que cette croissance se ralentisse mais de nombreux pays continueront à faire des efforts pour maintenir cette croissance à un niveau élevé d'une part parce qu'elle est indispensable au maintien de leur structure sociale d'autre part à cause de la pression interne des populations.

3) Les chiffres inclus dans le tableau VI correspondent à une évolution différenciée par zone géographiques. Dans les pays industrialisés on a pu supposer que les progrès technologiques permettront, pour les usages industriels, de ralentir la croissance des besoins énergétiques, notamment dans la perspective de hausse substantielle de l'énergie. Mais il est vraisemblable que cette réduction industrielle s'accompagnera d'une pression accrue de la demande vers des besoins énergétiques visant à des améliorations de "bien-être" et de la qualité de la vie. De sorte qu'il paraît douteux que la demande énergétique des pays industrialisés se réduise notablement, la structure de cette demande peut changer mais la valeur globale à notre avis ne risque guère de diminuer dans les prochaines années.

TABLEAU VI (Référence 4)

CONSOMMATION ENERGETIQUE MONDIALE

	Part de la consommation mondiale %				Consommation par habitant TEC/habitant				Consommations totale milliards de TEC.			
	1960	1970	1985	2000	1960	1970	1985	2000	1960	1970	1985	2000
<u>Pays dit occidentaux</u>	<u>65</u>	<u>64</u>	<u>59</u>	<u>48</u>					<u>2,9</u>	<u>4,8</u>	<u>9,3</u>	<u>13,4</u>
USA	39	36	32	24	9	12	18,5	22	1,7	2,7	5	7
Japon	3	5	7	5	1,4	3,8	8	10	0,13	0,4	1	1,4
Europe de l'Ouest	21	20	19	17	2,7	4,3	7	10	0,9	1,5	3	5
Afrique du Sud, Nlle. Zélande Australie.	2	3	1	2					0,05	0,09	0,3	0,5
<u>URSS - EUROPE de l'est</u>	<u>22</u>	<u>21</u>	<u>21</u>	<u>20</u>	3,1	4,6	8	13	<u>0,95</u>	<u>1,6</u>	<u>3,3</u>	<u>5,7</u>
<u>Pays en voie de développement</u>	<u>13</u>	<u>15</u>	<u>20</u>	<u>32</u>	0,3	0,4	0,9	2	<u>0,6</u>	<u>1,1</u>	<u>3,2</u>	<u>9,4</u>
Total Mondial	100	100	100	100					4,5	7,5	15,8	28,5

Hypothèse sur l'évolution de la population (millions d'habitants).

	1970	2000
Pays dits occidentaux	722	975
URSS - Europe de l'est	347	450
Reste du monde	2563	4750

4) La situation des pays en voie de développement apparaît très différente ; leur consommation énergétique par habitant est de l'ordre de 0,4 TEC/habitant tandis qu'elle est de l'ordre de 4 TEC/habitant en Europe et 12 TEC/habitant aux USA, mais la croissance de la population des pays en voie de développement est très rapide (ils représenteront en l'an 2000 les 3/4 de la population mondiale). En 1970 leur consommation d'énergie ne représente encore que 15 % du total mondial mais elle croit rapidement (elle a doublé entre 1960 et 1970). L'incertitude sur l'évolution des pays en cours de développement est grande mais on peut penser (et espérer) que l'évolution observée actuellement se maintiendra. Dans cette hypothèse leur consommation représenteront, environ le tiers de l'énergie consommée dans le monde . Si une telle prévision est exacte, et si les réserves prouvées ne sont pas supérieures à celles connues actuellement, on voit, d'après les tableaux des pages précédentes que le pétrole et le gaz risquent d'avoir pratiquement disparu vers la fin du siècle. Le charbon demeure toutefois un combustible fossile qui offre encore une grande sécurité.

1.4.2.2 - L'évolution de la demande dans l'Europe des 6

Le Tableau VII ci-joint met en évidence l'évolution de la consommation d'énergie dans l'Europe des 6.

en 1957 au moment où éclate la crise charbonnière,

en 1967 10 ans après

en 1970 ce qui permet des comparaisons utiles avec

les chiffres correspondants donnés par les USA.

en 1985 en utilisant 2 hypothèses:

l'une dite d'évolution spontanée c'est à dire continuant les tendances actuelles, (colonne A).

l'autre dite volontariste traduisant un sursaut pour une moindre dépendance vis à vis des ressources extérieures misant d'avantage sur le charbon, le gaz naturel européen et le nucléaire. (colonne B)

TABLEAU VII (référence 4)

CONSOMMATION ET PRODUCTION D'ENERGIE DANS LA CEE en MTEC.

	1957		1967		1970		1985	
	Consom.	Produc.	Consom.	Produc.	Consom.	Produc.	A	B
houille	2659	2395	2021	178,8	189,2	161,4	168	210
lignite	352	29,2	31,4	29,2	33,2	31,6	39	39
pétrole	95	11,7	360,5	20,9	501,2	19,4	1100	933
gaz naturel	7,6	7,6	30,9	30,7	73,3	73,9	280	355
électrique d'origine hydraulique ou nucléaire	30,1	296	42,3	37,8	48,9	44,5	222	272
Total	430,8	317,6	667,3	297,4	845,7	331	1809	1809
Déficit énergétique	113,2		369,9		514,7			

Ainsi apparait la croissance très forte du déficit énergétique européen.

1.4.3 - La structure de la demande d'énergie

Dans une économie moderne, la consommation d'énergie par les agents économiques utilise des formes d'énergie diverses. On ne s'intéressera ici qu'à celle qui ont retenu jusqu'à présent notre attention (charbon, pétrole gaz) laissant pour les paragraphes suivants les énergies nouvelles (nucléaires, fission, fusion) et les énergies dites de remplacement (éoliennes, marémotrice etc...). La difficulté essentielle pour saisir globalement la consommation d'énergie est constituée par l'agrégation de ces produits énergétiques mesurés à l'aide d'unités hétérogènes ; on utilise généralement des coefficients d'équivalence grâce auxquels une mesure unique de la consommation énergétique peut être faite. Il faut évidemment se demander si la constance de ces coefficients est compatible avec une modification continue et importante de la structure de la consommation. Dans un premier paragraphe on montrera qu'il y a sans doute distorsion entre le coefficient d'équivalence et l'énergie utile ; dans un second paragraphe on exposera la nature des tentatives faites pour tenir compte de cette distorsion, dans un 3ème paragraphe on examinera les conséquences possibles des indéterminations enfin, on proposera, compte tenu de l'évolution passée et des évolutions technologiques prévisibles une structure de cette demande pour les 25 prochaines années.

1.4.3.1 - Coefficient d'équivalence et efficacité relative des différentes formes d'énergie.

On constatera en premier lieu que cette équivalence varie légèrement d'un pays à l'autre et d'un organisme à l'autre. Si l'on adapte comme référence la tonne de charbon on a :

	France	Grande Bretagne	OCDE	Nations Unies
Charbon	1	1	1	1
Pétrole	1,5	1,7	1,4	1,1 à 1,5
gaz naturel 1000 m ³	1,4			1,33

On notera des différences de l'ordre de 25 % sur l'équivalence pétrole-charbon ; on pourrait évidemment songer à baser cette équivalence sur le pouvoir calorifique des différentes formes d'énergie ce serait sans doute insuffisant car les choix entre les diverses énergies ne reposent pas tous sur le pouvoir calorifique (s'il est possible de substituer aisément le pétrole au charbon pour le chauffage. Cette substitution n'a pas de sens pour les transports automobiles ou aériens).

Ceci est bien connu et ne condamne pas l'emploi de ces coefficients mais cela incite à la prudence dans les prévisions à long terme de la structure de demande énergétique. Par exemple dans le cas français la structure de la consommation énergétique a fortement varié au cours de la dernière décennie et l'on peut se demander si la modification de cette structure est sans

conséquence sur la demande réelle d'énergie. La substitution du pétrole au gaz ne cache-t-elle pas une demande réelle d'énergie plus grande qu'il n'y paraît si l'efficacité du pétrole est supérieure.

TABLEAU VIII
EVOLUTION DE LA STRUCTURE DE LA DEMANDE ENERGETIQUE
EN FRANCE EXPRIMEE EN MILLIONS DE TONNES

Années	Charbon	Pétrole	Gaz	Electricité	Total
1961	15	10,3	3,3	5	33,6
	44,6	30,2	9,7	15	
1971	5,6	24,5	7,9	9	57
	9,8	60,5	13,8	15,6	

L'électricité est comptabilisée sur la base de 1kWh = 860 Kcal. Si la réponse à ces questions est positive on mesure immédiatement les conséquences au niveau des prévisions : les extrapolations qui ne tiendraient pas compte de l'évolution de la structure de la demande énergétique risqueraient d'être notablement incorrectes car les évolutions qui se produisent dans le temps au fur et à mesure des substitutions entre les diverses formes d'énergie s'accompagnent de rajeunissement et de déclassements des appareils ainsi que d'amélioration des techniques d'emploi qui rendent malaisée l'interprétation des écarts consta-

tés entre les combustibles utilisés.

Le problème que l'on doit finalement se poser est d'arriver à connaître dans quelle mesure la consommation future d'énergie peut ne pas être celle à laquelle on s'attend où que l'on prévoit en utilisant les méthodes conventionnelles de calcul.

1.4.3.2 - Approches pour déterminer l'efficacité relative des différentes formes d'énergie.

La notion d'efficacité relative des diverses formes d'énergie n'a de sens que là où la substitution entre énergie est possible ; il faut donc déterminer les secteurs où un tel problème se pose.

1.4.3.2.1 Efficacité relative de l'énergie

Une distinction traditionnelle ventile la consommation d'énergie en 4 grands groupes : sidérurgie, industrie, transports, secteur résidentiel et tertiaire. Pour les 2 premiers l'énergie est un facteur de production spécifique, difficilement substituable du moins dans le court terme. Sur un plus long horizon de temps la substitution demeure peu probable, tant la chaîne technologique en vigueur est dominante ; le coke n'est pas sérieusement menacé par la réduction au gaz naturel, les transports (autres qu'électriques) s'ils ont encore un avenir, seront essentiellement fondés sur les produits pétroliers pendant longtemps encore. Aussi pour ces 2

secteurs n'est-il pas fondé de recourir à la notion d'efficacité relative ; celle-ci ne peut, au plus, avoir d'importance qu'à l'échelle de l'industrie (les différents secteurs industriels autres que la sidérurgie) et le secteur résidentiel et tertiaire ; mais ce phénomène est difficilement raisonnable et quantifiable.

1.4.3.2.1 - Les difficultés d'une mesure directe de l'efficacité relative des différentes formes d'énergie

Une thermique charbon peut ne pas avoir la même efficacité que la thermique fuel oil, ou gaz ou électricité pour 2 raisons principales.

Le rendement calorifique industriel est notablement différent du rendement calorifique théorique par suite des conditions d'utilisation dans le temps par exemple le rendement thermodynamique peut fort bien être identique au départ dans un équipement neuf parfaitement réglé mais il est évident qu'il variera différemment dans le temps selon la forme d'énergie.

L'énergie dominante après la 2ème guerre a été progressivement le pétrole qui a pris la place du charbon. Il s'ensuit qu'au cours de cette période les équipements neufs ont de plus en plus fait appel au pétrole, le vieillissement moyen des équipements brûlant du charbon s'étant corrélativement accru : ainsi l'évolution de la consommation d'énergie (utile) a été plus forte qu'il n'y paraît puisque l'énergie en régression (le charbon) a été comptabil-

lisé pour une quantité de thermies (utiles) par tonne probablement de plus en plus surévaluée par rapport au pétrole par exemple.

Pour mieux préciser le problème il faudrait connaître branche par branche, année par année, les usages de la consommation des différentes forme d'énergie, et la structure d'âge de l'équipement énergétique correspondant. Une telle démarche est aujourd'hui difficilement réalisable. L'approche la plus connue pour déterminer l'efficacité relative des diverses formes d'énergie est celle d'Adams et Miovic, elle peut se résumer brièvement ainsi. En supposant que la liaison entre l'énergie consommée et la production soit linéaire et qu'il n'existe pas de substitution entre l'énergie et le capital et/ou le travail (ce qui est valable instantanément) mais est contestable à plus long terme) on peut écrire.

$P = \alpha F$ avec P = Production

F = Énergie consommée calculée en terme d'énergie utile

$$\text{on a } F = \sum_i e_i h_i E_i$$

E_i = différentes formes d'énergie consommées (mesurées en unités spécifiques).

i = indice relatif à chaque forme d'énergie (charbon, gaz...)

h_i = pouvoir calorifique de E_i

e_i = coefficient mesurant l'efficacité de E_i .

Pour mesurer les valeurs de e_i Adams et Miovic ont recouru à des regressions multiples sur la plupart des pays de l'OCDE.

Leurs résultats a fait l'objet d'une vérification récente par LG BROOKS. Ces travaux permettent d'évaluer les conséquences que pourrait avoir l'interprétation du concept d'efficacité sur le niveau de la demande future d'énergie.

I.4.3.2.3 - Conséquences possibles sur les prévisions de consommations.

La substitution d'une énergie (pétrole) à une autre (charbon), la première étant plus efficace que la seconde, implique nécessairement que la consommation apparente soit constamment sous-évaluée et que la consommation prévue le soit totalement. Ces travaux effectués sur un contrat confié à l'Institut d'Etudes Juridiques et Economiques de l'Université des Sciences Sociales de Grenoble par la groupe "Energie et Environnement", permettent d'évaluer l'ordre de grandeur de cette sous-évaluation. Sur la base, d'une part des coefficients représentatifs du long terme calculés pour l'Europe de l'Ouest, d'autre part des hypothèses de croissance industrielles retenue par le plan pour la période 1970-85 la consommation finale d'énergie du secteur industriel en France serait majoré d'environ 30 %. Il serait évidemment hasardeux de considérer cet écart comme cas représentatif et spécifique du cas français mais, il force à la réflexion et à la prudence dans les travaux de prospectives.

I.4.4 - Esquisse d'un bilan énergétique français pour l'an 2000.

Les méthodes traditionnelles de prévision deviennent

très incertaines pour un horizon de 30 ans, car elles supposent une relative permanence des structures de l'économie.

A part les crises graves nationales ou internationales, politiques ou économiques (comme celle qui vient de se produire dans les produits pétroliers) les autres causes d'incertitudes concernent

- le taux de croissance de l'économie,
- les facteurs qui, à croissance économique donnée, peuvent affecter la croissance des besoins d'énergie tels que :
 - . la saturation de certains besoins (résidentiel, transport
 - . le développement de nouvelles techniques réductrices des dépenses,
 - . le développement de nouvelles applications (climatisation imposée, par la nécessité d'épurer l'air extérieur avant son injection dans les habitations.
 - . évolution des prix relatifs à l'énergie,
 - . la localisation des industries grosses consommatrices.
- la pénétration de l'électricité sur les marchés concurrentiels qui commandera l'évolution du nucléaire.

L'esquisse proposée prend pour base l'hypothèse 1985 définie lors des travaux préparatoires au VIe plan. (Cette hypothèse devra être revue pour tenir compte des corrections qu'imposent dès maintenant la hausse importante des produits pétroliers, et des décisions qui ont été récemment prise concernant l'accélération du nucléaire mais il règne actuellement une telle incertitude concernant l'évolution du marché pétrolier qu'il est prématuré d'inclure les conséquences de cette crise sur le long terme.

Sans en tenir compte l'esquisse proposée prévoit qu'au delà de 1985 la croissance des besoins énergétiques se ralentira à la fois parce qu'on atteindra, vraisemblablement des régimes de saturation énergétiques dans certains domaines et parce que vraisemblablement des efforts seront fait pour réduire les consommations énergétiques. Un taux annuel moyen de 3,4 % sur 1975-2000 conduit à 720 MTEC vers la fin de ce siècle ; ce taux de 3,4 % pour les besoins globaux est cohérent avec des taux de l'ordre de 2,4 % pour les besoins de l'industrie et des transports et de 3,5 % dans le secteur résidentiel et tertiaire.

La pénétration de l'électricité est supposée être, élevée dans le secteur résidentiel et tertiaire grâce au développement du "tout électrique" dans la construction neuve, régulière dans le secteur industriel ; faible dans le secteur des transports (succès limité de la voiture électrique en seul milieu urbain). Il en résulte une pénétration globale de 41 % de l'électricité dans le secteur énergétique. Le tableau IX suivant présente ces hypothèses de consommation

Le taux de croissance intermédiaire est indiqué entre parenthèse. Les besoins de combustible finaux sont la somme des quantités de produits énergétiques livrées au marché intérieur, déduction faite du gaz de haut fourneau et de la production d'électricité des centrales industrielles (ceci afin d'éviter les doubles emplois d'une part avec le coke (d'autre part avec les combustibles servant à produire cette électricité).

TABLEAU IX
PREVISION DES BESOINS ENERGETIQUES FRANCAIS.

		1955	1970	1985	Fin du siècle
Résidentiel	Energie	26,5	73 (7)	60 (5,4)	270 (3,6)
	Tertiaire	23,4	55	45	115
Agriculture	Electricité	3,1	13,3	65	155
MTEC	Electricité/Energie	0,11	0,18	0,41	0,57
Industrie (MTEC)	Energie	43	80,5	145	240
	Combustible	33,5 (4,3)	55 (4)	92 (3,4)	135
	Electricité	9,5	25,5	53	105
	Electricité/Energie	0,22	0,32	0,36	0,44
Transport (MTEC)	Energie	18	37,3 (5)	85 (5,6)	140 (3,4)
	Combustible	17,1	35,1	82	130
	Electricité	0,8	2,3	3	10
	Electricité/Energie	0,04 %	0,067	0,035	0,07
Energie finale MTEC	Energie	87,3	190	390	650
	Combustible	73,9	150	270	380
	Electricité	13,4	41	120	270
	Electricité/Energie	0,15	0,21	0,31	0,41

Dans le Tableau X les besoins d'énergie primaires sont calculés en additionnant les productions nationales d'énergie primaire (charbon pétrole brut, gaz naturel, électrique, hydraulique et nucléaire) et le solde net du commerce extérieur de toutes

les formes d'énergie primaire et secondaire (donc y compris le coke, les anodimères, les produits pétroliers raffinés, les gaz manufacturés et l'électricité quelle qu'en soit son origine) et en réduisant les augmentations (ou en ajoutant les diminutions) des stocks des producteurs, transformateurs et importateurs.

La quantité, l'énergie primaire est donc plus importante que dans le tableau précédent d'environ 10 à 12 %.

TARLEAU X
BESOINS ENERGETIQUES FRANCAIS.

Années	1955	1970	1985	Fin de siècle
Energie primaire MTEC	108	223	465	789
[Electricité (TWh)(MTEC)	46,6 15,4	140 47	400 132	900 300
dont hydraulynée(TWh) (MTEC)	26 8,7	56 18	62 21	65 22
nucléaire (TWh) (MTEC)	0	5 2	176 59	750 250
thermique (TWh) (MTEC)	20,6 16,7	79 27	160 53	85 28
% de combustible fissile importé pour la produc- tion électrique thermique	12 %	33 %	86 %	90 %
Combustible fissile MTEC	99	203	385	517
Charbon MTEC	68	45,5	10	
hydrocarbure énergétique (MTEP)(MTEC)	19 28,5	97 146	230 330	295 442
hydrocarbure non énergé- tique.	1,5 2,5	7,5 11,5	30 45	50 75
Pétrole MTEP	20,2	94	215	300
Gaz naturel Gm ³	0,3	11	40	55

Ces Tableaux mettent en évidence, qu'avec les hypothèses adoptées :

1°) la part de l'électricité croît constamment et atteint 41 % de la production totale d'énergie à la fin du siècle,

2°) le nucléaire assure environ 83 % de la production de l'électricité à la fin du siècle, l'hydraulique 7 % et le combustible fossile 10 %,

3°) que malgré cet effort nucléaire important il faut encore importer environ 300 millions de tonnes de pétrole et 55 milliards de m³ de gaz.

4°) l'énergie nucléaire représente environ le 1/3 de toute l'énergie consommée.

D'autres variantes à ces hypothèses ont été examinées; elles supposent une pénétration électrique plus rapide, par exemple visant à atteindre 50 % (au lieu de 41 %) vers la fin du siècle.

1.5 - LE CYCLE DE L'ENERGIE DANS LA SOCIETE INDUSTRIELLE

Le tableau précédent donne une idée de la consommation de l'énergie en France, il est intéressant d'examiner quel usage est fait de cette énergie consommée par les divers secteurs de la société industrielle et de déterminer la fraction de l'énergie utilisée pour produire un travail effectif et la fraction d'énergie perdue. Nous examinerons d'abord la situation américaine puis ensuite la position française. Le schéma ci-joint (Tableau XI) permet de suivre les transformations et les usages de l'énergie à ses divers stades pour la société industrielle américaine en 1970.

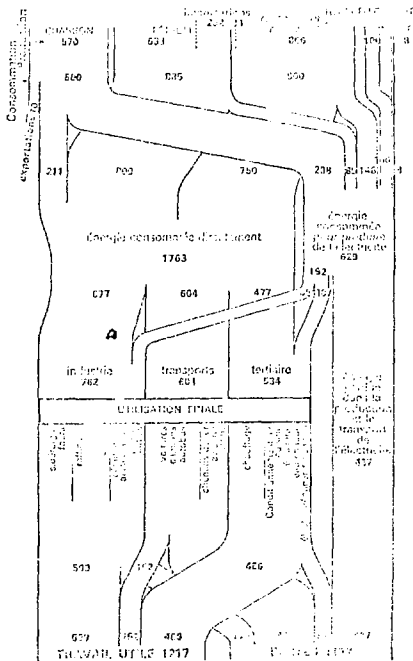


Tableau XI (reference 5)

1. Ce tableau devrait en fait être présenté en kilocalories (originellement, il est en BTU ou British Thermal Units), unité moins « parlante » que la tcc, que nous avons préférée pour cette raison.

Le flux d'énergie à l'entrée est essentiellement constitué par le charbon, le pétrole, le gaz, l'énergie hydroélectrique et pour une très faible partie de nucléaire.

Le charbon a fourni 23 % de l'énergie consommée

le pétrole	"	"	37	"	"	dont 10 % a été importé
le gaz	"	"	36	"	"	2 %
l'hydraulique	"	"	4	"	"	
le nucléaire	"	"	0,3	"	"	

L'énergie totale consommée a été de 2,4 milliards de TEC (soit le 1/3 de l'énergie consommée dans le monde). Sur cette quantité 26% a été utilisée pour la production d'énergie électrique et, les 75 % ont servi à l'industrie, aux transports, au secteur résidentiel et tertiaire.

Le rendement de transformation énergétique globale est seulement de 51 % - donc la moitié de l'énergie consommée est perdue le rendement énergétique industriel est de 75 %, celui des transports 25 %, celui de la production d'électricité est de 31 %, celui du secteur tertiaire et résidentiel 80 %, de sorte que l'énergie utilisée se répartie de la façon suivante :

industrie	: 50 %
transport	: 12 %
tertiaire résidentiel	38 %

On constate également que l'électricité représente 24 % du flux d'énergie entrant mais ne produit qu'environ 13 % du tra-

vail final. Enfin on remarquera que les USA ont assuré 90 % de leurs besoins d'énergie en 1970. Dans les pays Européens la situation ne serait pas fondamentalement différente de ce qu'elle est au USA, cependant on noterait pour la France en particulier :

- une consommation globale en 1970 de 10 % de celle des USA, 10,22 milliards de TEC pour une population 5 fois plus faible,
- une répartition des combustibles entrant très différente
 - charbon 20 %
 - pétrole 70 %
 - gaz 1 %
 - hydraulique 8%
 - nucléaire 1 %
- une importation très importante des combustibles fossiles environ 75 %
- une répartition un peu différente des consommations électriques. alors qu'au USA la consommation globale d'électricité se répartit à raison de 56 % dans le secteur domestique et tertiaire et 44 % dans l'industrie, en Europe et en France en particulier c'est le secteur industriel qui s'assure la majeure partie avec 61 %.

Le cas français n'est pas notablement différent du cas des autres pays européens mais il est l'un des plus mauvais en ce qui concerne les importations de combustibles fossiles elles représentaient 65 % en 1965 contre 59,2 % pour l'ensemble de l'Europe et devrait être de 82% en 1980, contre 63,5 pour l'énergie la part de l'électricité étant de 21 % de la consommation

d'énergie en France contre 25 % en Europe. Entre 1964 et 1970 le taux de croissance de la consommation n'a été que de 6,25 % par an contre 9 % pour l'Europe.

Les tableaux XII et XIII (V. (ref. 3) ci-joint mettent en évidence

1) la répartition de la consommation énergétique française par secteur en 1972,

2) les flux énergétiques dans la société française en 1972 ;

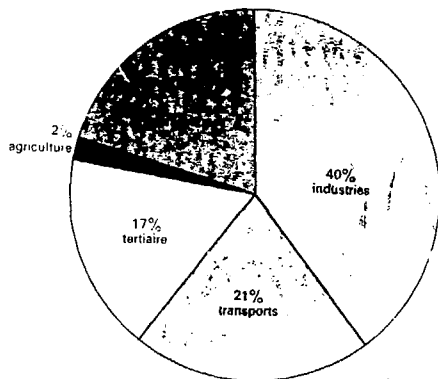
3) la fraction d'énergie importée en France en 1972.

1.6 - RENDIMENT ENERGETIQUE

Les paragraphes précédents font apparaître que la société moderne industrielle peut être considéré comme essentiellement une machine complexe dégradant l'énergie de haute qualité en énergie dégradée (d'entropie faible) considérée comme résidu thermique tout en produisant les biens et les services nécessaires à la vie humaine. Aux USA en 1970 l'énergie résiduelle a été équivalente à l'énergie effectivement utilisée.

L'efficacité avec laquelle l'énergie est convertie en travail utile dépend beaucoup de la méthode de conversion quand le bois ou le charbon sont brûlés dans un foyer domestique au moins 20 % de l'énergie est utilisé pour le chauffage de la pièce, un four domestique bien conçu peut par contre atteindre 75 % de rendement.

TABLEAU XII



Consommation des différentes énergies par secteur en 1972.

	Charbon	Pétrole	Gaz	Électricité	Total
Sidérurgie . . .	14	3,5	2	3,4	22,9
Autres industries	4,5	31	7,5	22	65
Domestiques et Tertiaire	9	44,5	8	16,5	78
Agriculture	-	4	-	-	4
Transport	-	4	-	2	43

Les chiffres sont exprimés dans une unité commune, la Tec (tonne d'équivalent charbon) qui représente l'énergie thermique que peut fournir une tonne de charbon.

1 tonne de pétrole vaut 1,5 Tec.
1 000 m³ de Gaz Naturel valent 1,5 Tec.

Pour faire 1 000 kWh, il faut 1/3 Tec.

En 1972, les flux
étaient les suivants :

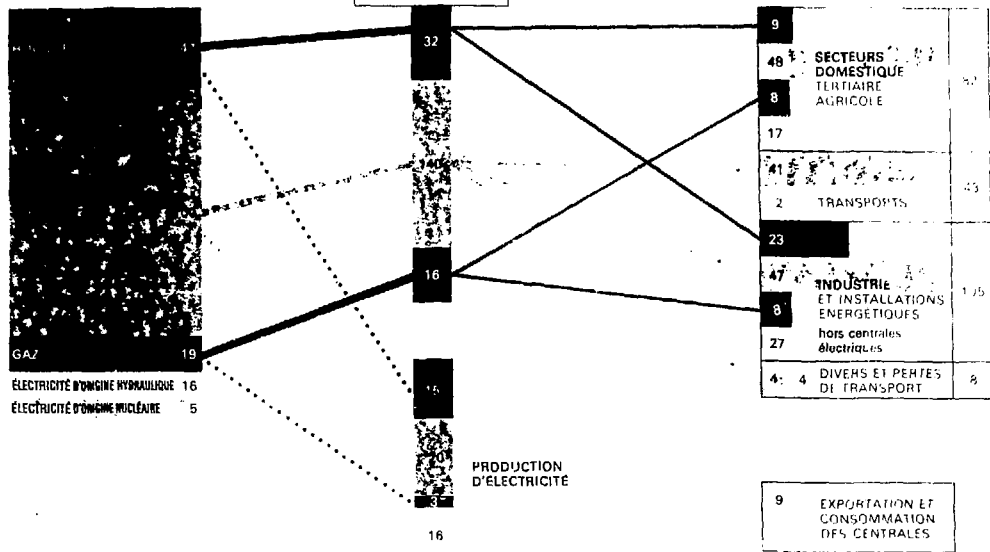


Tableau XIII

Quelle fraction de notre énergie produisons-nous en France ?

En millions de Tec	Besoins 1972	Production française 1972
Charbon	46,7	33,5
Pétrole	159,6	2,1
Gaz	19,3	10,5
Électricité		
- hydraulique	16,2	
- nucléaire	4,2	20,8

Notons ici que

Nos ressources couvrent un peu
moins de 30 % de nos besoins.

Tous les pays sont-ils dans le même cas ?

EUROPE

JAPON
U.S.A.

Tableau XIV

L'efficacité moyenne des combustibles fossiles pour le chauffage domestique est de 50 à 55 % (ce qui montre que le chauffage électrique n'est pas une solution satisfaisante en ce qui concerne l'économie de l'énergie) alors qu'il était environ le 1/3 de chiffre au début de ce siècle. L'accroissement le plus spectaculaire du développement énergétique concerne la production d'énergie électrique ; en 1900 environ 5 % de l'énergie du combustible était converti en électricité, on arrive maintenant à 33 % dans les centrales nucléaires actuelles et 47 % dans les centrales à fuel modernes. La récupération de l'énergie rejetée par les centrales pourrait être entreprise ; jusqu'à présent cette possibilité n'a pas paru économique, peut être en sera-t-il autrement en temps de pénurie d'énergie. En ce qui concerne les moyens de transports, les USA par exemple y consacrent 16 % de la totalité du combustible fossile consommé, ce chiffre est plus faible en Europe, de l'ordre de 8 à 10 %), le rendement énergétique des automobiles est de l'ordre de 25 % et il est difficile d'imaginer qu'il puisse croître beaucoup (il a augmenté de 2 % en 25 ans). En ce qui concerne la vitesse il faut 8 fois plus d'énergie pour propulser une voiture à 110 km/heure qu'à 55 km/heure. L'énergie potentielle des moteurs de voitures est considérable (17 milliard de cv aux USA, et on a calculé que si en l'an 2000 les 100 millions de voitures américaines de l'époque devenaient toutes électriques (leur énergie étant empruntée au réseau électrique national, il faudrait augmenter la puissance électrique installée de 75 % (ce qui est inimaginable dans un délai court). Cet exemple illustre les possibilités et les limitations de la voiture électrique.

Le rendement d'une locomotive à vapeur est de l'ordre de 10 %, tandis que celui d'une locomotive diesel-électrique est de 30 %. L'électrification des réseaux de chemin de fer conduit à un rendement énergétique inférieur à la locomotive diesel électrique.

L'éclairage électrique à l'aide des lampes à incandescence est particulièrement mauvais, moins de 1 % de l'énergie émise par une ampoule ordinaire rayonne dans le spectre visible (95 % de l'énergie est dans l'infrarouge). Une lampe à fluorescence a un rendement meilleur de l'ordre de 20 %. De sorte que le rendement moyen de l'éclairage est de 4 %.

Dans le but d'accroître les rendements des installations génératrices d'électricité on a songé à utiliser la conversion directe de l'énergie calorifique d'un gaz chaud en électricité, ce procédé est connu sous le nom de magnéto hydrodynamique (MHD). Dans un tel dispositif, les gaz très chauds du combustible brûlé sont rendu conducteurs de l'électricité en les ensemençant par des corps tels que le potassium qui ont une énergie d'ionisation particulièrement faible, le gaz conducteur passe à très grande vitesse dans un champ magnétique donnant naissance directement un courant électrique. Ces études se heurtent à des difficultés technologiques sérieuses (le potassium corrode très rapidement les matériaux qui sont en outre portés à de très haute température); il s'agit essentiellement de problèmes technique qui s'amplifient avec la mise au

point de matériaux réfractaires adéquats. Si ces difficultés sont surmontées le rendement des centrales électriques utilisant des générateurs utilisant la MHD pourra approcher 50 %.

De toutes ces considérations, il ressort que la production d'énergie sur terre par les moyens actuellement connus ne peut guère être obtenue avec des rendements dépassant 50 %.

1.7 - LE ROLE DU PETROLE A COURT ET MOYEN TERME

Les paragraphes précédents ont montré que, si la croissance économique se poursuit et si aucune catastrophe naturelle ou sociale (conflit par exemple) ne se produit, les besoins énergétiques mondiaux ont de grandes chances de continuer à augmenter. Il faut certes considérer avec prudence les esquisses proposées concernant les besoins énergétiques du futur qu'ils soient évalués à l'échelle mondiale (environ 16 milliards de TEC vers 1985) européenne (2 milliards de TEC pour l'Europe des 6 à la même époque) français (0,450 milliards de TEC en 1985), mais les ordres de grandeur devraient être approximativement valable car, ni les structures sociales ni les techniques ne peuvent évoluer suffisamment rapidement pour les remettre en question dans les dix prochaines années, au delà, vers la fin du siècle les prévisions sont certainement plus sujettes à controverse.

S'il en est ainsi il apparait que le pétrole restera pour le court et le moyen terme notre source d'énergie dominante

(nous examinerons dans les paragraphes suivant les raisons d'une telle situation). Les changements ne peuvent intervenir que lentement (en excluant toujours les catastrophes, car l'industrie énergétique est une industrie lourde très capitalistique à titre d'exemple avec 1 milliard de francs, on peut soit construire une raffinerie traitant 10 millions de tonnes de pétrole par an,

- soit construire 5 pétroliers de 250 000 tonnes
- soit construire 3 méthaniers de 125000 tonnes
- soit construire 10 plateformes de forage de pétrole
- soit construire une centrale nucléaire produisant mille mégawatts d'énergie électrique,

mais cette même somme d'argent représente approximativement le prix de 2 avions commerciaux ou le coût de construction de 400 logements.

De même l'industrie énergétique nécessite des délais relativement longs avant la mise en productions des installations. A titre d'exemple, un délai de 5 à 7 ans s'écoule entre la prise de décision de construction d'une centrale électrique et sa mise en exploitation ; il faut environ le même temps pour que les puits de gaz de la mer du Nord deviennent productifs, enfin, entre la découverte et la mise en exploitation d'un gisement pétrolier il s'écoule couramment 8 ans. C'est la raison pour laquelle les prévisions de l'horizon 1985 doivent être préparées dès maintenant afin que les réalisations puissent aboutir en temps utile. On a vu que les réserves en combustibles fossiles

sont encore considérables. Jusqu'en 1972, la consommation mondiale n'a représenté que la 1000e partie des réserves connues ; on peut donc en principe pour faire face aux besoins à venir, continuer à exploiter les ressources de combustibles fossiles sans trop se soucier de leur épuisement, mais , comme on le verra plus loin le prix de ce combustible fossile

1) à tendance à être de plus en plus cher,

2) il est concentré en des gisements qui sont (à part les USA et l'URSS) très éloignés des centres de consommation,

3) il est sous la dépendance, tout au moins pour le pétrole, soit de sociétés multinationales, soit de pays peu industrialisés, de sorte qu'en particulier, l'Europe et le Japon sont dans une situation difficile,

4) la production et l'utilisation d'énergie est polluante et elle est remise en cause par une partie de la population,

5) d'autres sources d'énergie commencent à devenir disponibles et peuvent concurrencer ces combustibles fossiles. Ces éléments déterminent ce que l'on appelle la crise de l'énergie nous en examinerons successivement les différents dans les paragraphes suivants.

CHAPITRE I I

LA CRISE PETROLIERE.

La crise pétrolière ne doit pas être confondue avec une pénurie d'énergie, si le pétrole devient un combustible rare (donc de plus en plus cher), il existe des sources d'énergie de remplacement telle que le charbon (en particulier aux USA et en URSS) et l'énergie nucléaire qui peuvent faire face aux demandes de l'avenir. Cette rareté d'un produit qui était devenu le combustible principal des économies occidentales va conduire à des modifications de la technologie et la structure sociale de ces économies.

II.1 - GÉOPOLITIQUE DE L'ÉNERGIE FOSSILE

II.1.1 - Le charbon

Les USA et l'URSS possèdent des réserves importantes de charbon, le cas de l'Europe et du Japon est bien différent. En 1957 les combustibles solides représentaient environ les 3/4 de la consommation d'origine européenne (le pétrole le 1/5) et ils étaient extraits à 90 % du sous-sol de l'Europe.

L'Allemagne était loin de ses possibilités maximales de production mais la France, la Belgique et la Hollande et dans une certaine mesure l'Angleterre rencontraient des difficultés techniques de plus en plus grande pour produire du charbon à un prix compétitif avec les autres combustibles. La production de charbon par homme atteignant difficilement quelques tonnes/jours qu'aux USA, ce chiffre était de l'ordre de 10 à 20.

La recession économique de 1957 fut fatale au charbon européen qui, vendu au prix moyen annulant grosso modo les profits des mines rentables par les pertes des mines déficitaires et, non au prix marginal (comme c'était le cas du pétrole vendu par les grandes compagnies) ne put se maintenir ; en outre l'amélioration des conditions de frêts transatlantiques rendit le charbon américain livré en Europe, à un prix inférieur au charbon européen.

Comme pour compliquer encore le problème, ainsi que le fait remarquer M. Grenon (référence 5), les pétroles du moyen-orient recherché par les Compagnies multinationales pour abreuver les USA fut dévié de sa première destination par l'instauration des quotas d'importation par l'administration américaine afin de préserver les producteurs américains dont les prix de production étaient supérieurs à ceux du Moyen Orient. En conclusion, dit M. GRENON, on aligna les prix du charbon européen sur ceux pratiqués aux USA et on se mit à importer du pétrole du Moyen-Orient. Il était difficile de procéder autrement, toutefois, il apparaît, surtout à la lueur des événements récents dans le domaine du pétrole, qu'il eût été sage de conserver au charbon européen ses possibilités en cas de renchérissement du coût du pétrole. En 1970, le charbon ne contribuait plus que pour 24 % à la couverture des besoins énergétiques européen. Il est deux secteurs où l'utilisation de charbon devrait continuer à jouer un rôle important en Europe et en France en particulier, ce sont ceux concernant la sidérurgie et l'alimentation des centrales électriques. Dès maintenant l'Europe doit importer

15 millions tonnes par an de coke métallurgique dont une dizaine de millions de tonnes pour la France). En ce qui concerne les centrales thermiques, le charbon et la lignite ne couvrent plus que la moitié des besoins européens (33 % seulement dans le cas français) Il serait raisonnable compte tenu de la conjoncture de maintenir la possibilité de brûler dans les centrales soit du charbon, soit du gaz, soit du fuel. La Pologne qui a été longtemps fournisseur privilégié pour la France va sans doute retrouver sa place dans ce domaine.

11.1.2 - Le pétrole

Alors que jusqu'à un passé récent les mines de charbon étaient la propriété soit de particuliers soit de Sociétés privées implantées dans le pays d'exploitation, soit étaient nationalisées (France), le pétrole est demeuré jusqu'à la récente crise de l'énergie entre les mains des sociétés multinationales, très puissantes. Les USA sont actuellement dans une situation qui n'est pas sans rappeler celle que l'Europe a connu pour le charbon ; ils disposent de ressources pétrolières importantes et sont contraints de protéger leur production nationale relativement couteuse contre le pétrole importé du Moyen Orient à des prix bien inférieurs à ceux pratiqués sur le marché américain. Mais les sociétés pétrolières multinationales sont en grande partie d'origine américaine, d'où la complexité du problème pétrolier dont l'origine a été récemment fort bien expliqué dans le dernier ouvrage de Jean Marie Chevallier.

II.2 - L'EVOLUTION DU MARCHE DU PETROLE AU COURS DES DERNIERES DE- CENNIES

3 périodes peuvent être distinguées :

II.2.1 - Jusqu'en 1950 le marché du pétrole est dominé par le cartel qui est constitué par 8 grandes compagnies dont 5 américaines, Standard Oil of New Jersey, devenue récemment Exxon, Socony Mobil Oil, Standard Oil of California (Socal), Texaco, Gulf Oil et 3 Européennes Shell, Bristish Petroleum et la Compagnie Française des Pétroles. Pendant toute cette période l'industrie du pétrole, quel que soit le niveau auquel on se place (exploration, production, transport raffinage, distribution) est une industrie moderne à progrès technique rapide et coût décroissants ; cette situation est favorisée par l'abondance des ressources du Moyen Orient et leur facilité d'exploitation ; les prix sont fixés par les compagnies en prenant comme référence le prix du pétrole américain du golfe du Mexique, qui est beaucoup plus cher que celui du Moyen Orient.

II.2.2 - A partir de 1950, de nouvelles Sociétés apparaissent, les unes sont totalement privées et d'origine américaines ou Japonaise, les autres sont constitués par des organismes publics ou parapublics (ERAP en France). Leur agissement a pour conséquence une baisse des prix du pétrole et une diminution de l'influence des compagnies du Cartel (appelées souvent les Majors), en outre l'URSS disposant à cette époque de ressources pétrolière disponibles peut en vendre sur le marché mondial, enfin des découvertes

importantes sont mises à jour en Afrique du Nord, tout ces éléments entraînent une baisse du prix du pétrole dont bénéficient tous les pays utilisateurs de pétrole. Les Sociétés pétrolières multinationales continuent à dominer le marché en 1970, elles contrôlent encore 80 % des exportations mondiales de brut et 90 % de la production du Moyen Orient. Les énormes ressources du Moyen Orient constituent à la fois l'origine d'une partie importante de leur revenus financiers mais également un moyen d'ajuster l'offre et la demande en augmentant ou en réduisant la production des différents pays producteurs. Il s'agit d'un marché essentiellement oligopolitique qui approvisionne de façon régulière les consommateurs. A titre d'exemple, J.M. Chevallier rappelle qu'au moment de la crise iranienne en 1951 l'arrêt de la production de l'Iran qui représentait 20 % de la consommation européenne n'a pas perturbé l'appauvrissement européen car le Koweït et l'Irak y ont suppléé instantanément. En 1956, la nationalisation du canal de Suez a posé des problèmes à l'Europe, par suite d'une insuffisance de la flotte pétrolière mondiale mais non pas à cause de la rarefaction du pétrole. Enfin en 1967, la guerre des 6 jours et la fermeture du canal de Suez n'a pratiquement pas gêné le ravitaillement européen.

11.3 - LA CRISE PETROLIERE

C'est à partir de 1970 que commence la crise du pétrole que l'on confond généralement avec la crise de l'énergie tant le pétrole prit une place importante dans la production d'énergie.

11.3.1 - Les principales raisons de la crise pétrolière

Les raisons sont multiples, elles concernent :

1) La raréfaction de l'offre due :

a) à la fermeture du Euphrate (oléoduc qui évacue une partie importante de la production de l'Arabie Saoudite) par la Syrie qui cherche à obtenir une augmentation des redevances de l'Aramco

b) à une réduction autoritaire de la production libyenne décidée unilatéralement par le colonel Kadhafi, en 1970 la Libye était devenue premier exportateur mondial de brut et cette réduction a entraîné une baisse de 50 millions de tonnes des livraisons à destination de l'Europe.

c) la crise des frets qui a pour origine la nécessité d'approvisionner l'Europe à partir du golfe en faisant le tour de l'Afrique au lieu de l'approvisionner à partir de l'Afrique du Nord.

2) L'augmentation de la demande et des coûts

dont les raisons principales sont les suivantes :

a) L'augmentation de la demande d'origine en partie conjoncturelle. En 1970, la croissance économique est plus forte que prévue en particulier au Japon et en Europe, et la campagne antipollution oblige les producteurs d'électricité américaine et européenne à rechercher les fuels peu sulfureux du Moyen Orient de sorte que les demandes du Japon, des USA et de l'Europe sont très importantes.

b) Les nouvelles zones de production et le passage des coûts décroissant aux coûts croissants. Jusqu'en 1970 les nouveaux gisements pétroliers qui étaient mis en exploitation au Moyen Orient étaient facilement exploitables de sorte que le coût tendanciel du pétrole, grâce à l'abondance des gisements du Moyen Orient étaient en général décroissant. Pour faire face aux besoins prévisibles des économies occidentales les compagnies ont entrepris la mise en valeur de nouveaux gisements en Alaska et en Mer du Nord principalement. L'hypothèse centrale de l'argumentation de JM Chevallier (référence 6) est que l'on est en train de passer de zones de coûts décroissant à des zones de coûts croissants (aussi bien au niveau de l'exploitation que de la production) de sorte que tout le nouveau pétrole dont auront besoin les économies occidentales sera dans les années à venir, beaucoup plus coûteux que par le passé ; à titre d'exemple la construction d'un pipeline depuis l'Alaska jusqu'aux USA de 1250 km aura coûté environ 3 Milliards de \$. Quand au pétrole off shore de la mer du Nord son prix sera probablement plus élevé que celui de l'Alaska.

Dans ces conditions, les pays exportateurs de brut peuvent aisément imposer leur prix, ils visent sans doute à atteindre le prix marginal du brut de la Mer du Nord et de l'Alaska, ainsi, la rente pétrolière du Moyen Orient risque d'être d'autant plus facilement réévaluée que les économies occidentales en situation de pénurie sont prêtes à accepter des prix élevés. Ainsi, d'après J.M. Chevallier, la crise de 70-71 marque bien

comme on l'a dit la fin du marché de l'acheteur et le début du marché du vendeur.

c) La situation énergétique américaine des années 70-7. La productivité moyenne d'un puit de pétrole américain est d'environ 2t/jour, celle des puits du Moyen Orient est de l'ordre de 500 t/jour, le gouvernement américain doit donc protéger ses propres exploitants, il est conduit à contingerer les importations afin de maintenir ses exploitations en activité et à accepter des prix intérieurs relativement élevés. Avant la crise de 1970, les USA s'approvisionnaient pour 20 % en brut domestique à 3,5 \$ par baril et pour 20 % à l'extérieur à 2,17 \$ par baril. L'Europe et le Japon n'ont pas une telle suggestion ils ont à ce point de vue un avantage certain (mais c'est une piètre consolation).

II.3.2 - Quelques conséquences de la crise pétrolière

Les USA et les pays producteurs ne peuvent être que favorables à un relèvement des cours du pétrole. Ce prix a subi de nombreuses hausses. Dans un premier temps le prix du brut du Golfe Persique a été relevé à la suite d'un accord signé à Téhéran entre les membres de l'OPEC et 15 grandes compagnies internationales (les 7 majors, la CFP et 7 Compagnies indépendantes opérant en Libye) puis le prix du brut méditerranéen a été fixé à la suite de négociations avec les principaux producteurs en 71. A la suite de non convertibilité du \$, de la dévaluation du \$ par rapport à l'or et de la réévaluation de certaines monnaies fortes, le prix du brut a été majoré au cours de négociations

menées à Genève entre les compagnies multinationales et les pays producteurs ; en outre, des formules de révision de prix ont été prévues lors des accords de New York en 1972. Le principe de la participation des Sociétés pétrolières des états producteurs avec des Compagnies multinationales a été accepté et certains Etats ont acheté des prises de participation qui étalées dans le temps jusqu'en 1983 leur assureront 51 % des actions ; (ce qui permet alors en partie de récupérer les \$ supplémentaires payés par suite d'augmentation du prix du fuel et évite que les énormes capitaux flottant dont disposent les pays arabes ne perturbent la situation monétaire internationale.)

Si telle est la situation, le marché du pétrole qui jusqu'à maintenant était oligopolitique et très régulier risque de se morceler et de devenir un marché fractionné où régnera peut-être une concurrence entre les producteurs que seule limitera la solvabilité des nations importatrices (essentiellement l'Europe, le Japon et dans une certaine mesure les USA). C'est ce qui fait dire à J.M. Chevallier que les Sociétés multinationales organisent la fin de l'ère du pétrole et préparent d'autres sources d'énergie pour l'avenir (nous examinerons quelles sont celles qui paraissent les plus prometteuses dans les paragraphes suivants). Il est très difficile de prévoir l'évolution des Sociétés pétrolières multinationales ; certains pays tels l'Iran, l'Arabie Saoudite, les Emirats semblent décidés à participer en collaboration avec les Sociétés à l'expansion de cette industrie dans le monde (ne voit-on pas NIOC participer aux recherches en mer du Nord) d'autres comme l'Algérie,

le Venezuela, la Libye, l'Italie, préfèrent rester seuls, mais en sera-t-il toujours ainsi ? L'histoire du pétrole a souvent été mêlée à la politique, il serait bien étonnant qu'il en soit autrement dans le futur.

Si le prix du brut Libyen est en fin de compte déterminé par le prix du brut d'Alaska ou de la mer du Nord, les bénéfices que les pays du Moyen Orient et d'Afrique du Nord peuvent espérer sont tels, que la lutte sera âpre. L'industrie du pétrole a jusqu'à présent procurée des bénéfices substantiels. A titre d'exemple le brut moyen était au milieu de 1973 vendu aux consommateurs français aux prix de 520 F la tonne, ce prix se décomposait de la façon suivante :

Producteur	: 1,1 %
Transport	: 3,4 %
Raffinage	: 4,8 %
Distribution	: 6,7 %
Fisc du pays producteur	: 11,2 %
Fisc Français	: 50,6 %
Profit des diverses Sociétés	: 22,2 %
	<hr/>
	100 %

Dans cette lutte les sociétés multinationales conservent des atouts sérieux :

L'approvisionnement de la France pouvait en 1972 se schématiser ainsi :

Au niveau de la production, des Groupes à capitaux français

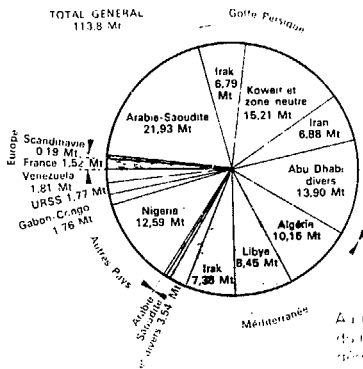
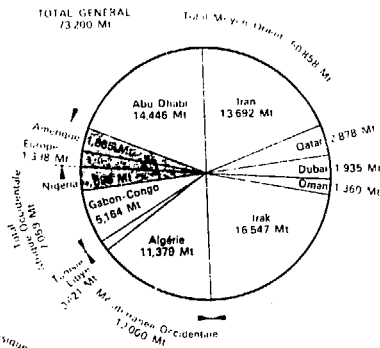


TABLEAU XV

Au niveau de l'approvisionnement physique des pays à capitaux français

1) Ainsi qu'on peut le voir, certains pays producteurs leur apportent leur collaboration.

2) Elles ont une très grande connaissance des marchés pétroliers à tous les stades de la mise en oeuvre.

3) Aucun des grands pays occidentaux n'a jusqu'ici pris en main sa politique énergétique ; c'est ainsi que l'industrie pétrolière de la France en 1972 comprend :

2 groupes à capitaux français Total, Elf Aquitaine Antar dont l'activité va de l'exploitation à l'extraction jusqu'à la distribution des produits finis en passant par le transport et le raffinage,

d'autres Sociétés parmi lesquelles 6 filiales d'importants groupes étrangers : Shell, BP, Esso, Mobil, Fina, Agip qui assurent une diversité et une certaine sécurité des approvisionnements,

75 importateurs distributeurs qui s'approvisionnent en produits raffinés soit auprès d'autres raffineries, soit directement à l'importation. Le schéma XV représente l'approvisionnement de la France en 1972.

A une époque où la rentabilité du pétrole risque de diminuer peut-être des Sociétés étatiques vont-elles reprendre la succession des sociétés privées comme ce fut le cas des chemins de fer et des houillères françaises ? Rien ne paraît moins sûr pour le moment.

4) elles ont entrepris des opérations de diversification (Shell, BP et la CFP paraissent se tourner vers la chimie). et de reconversion vers de nouvelles sources d'énergie (les sociétés d'origine Américaine tout particulièrement).

5) La mutation ne pourra être que très lente car ainsi qu'on l'a montré précédemment les évolutions technologiques sont lentes à apparaître.

6) Le groupe des pays importateurs n'est guère en mesure de constituer un cartel, comme certains le souhaitent. Soumis à la hausse tendancielle des coûts chaque pays essaye de lutter individuellement pour se procurer aux meilleures conditions possibles, l'énergie qui lui est nécessaire (la France envisage des accords de troc avec certains pays). Bien que chaque état européens dispose pourtant d'Entreprises publiques importantes dans le secteur énergétique. L'Europe occidentale n'a pas été jusqu'ici capable de se définir une politique énergétique commune. Dans cette lutte la position des USA, consommateur gigantesque parmi la multitude des petits restera vraisemblablement déterminante, d'autant plus que les principales sociétés multinationales pétrolières relèvent plus ou moins de l'obédience américaine.

La crise pétrolière actuelle constitue sans doute une crise majeure et non un épiphénomène, l'époque de l'énergie à bon marché semble révolu.

11.5 - LE GAZ NATUREL

L'Europe de 1955 se préparait à l'atome, mais à partir de cette date c'est le gaz qui a connu le développement le plus spectaculaire, forès la découverte des gisements du sud de la mer du Nord. L'apport du gaz algérien, puis la découverte du gisement de Groninger en Hollande (dont l'importance est évaluée à 1000 milliards de m³ (2 millions de TEP).

Cette découverte gazière se prolonge sous la mer du Nord, et des gisements paraissent exister à proximité des eaux norvégiennes. La progression de l'emploi du gaz en Europe est très forte et la demande est telle qu'il a fallu chercher des sources nouvelles d'approvisionnement. Plusieurs pays européens ont passé des contrats importants avec l'URSS qui possède des réserves abondantes en Sibérie, des contrats à long terme ont ainsi été passés portant sur une livraison de l'ordre de 150 milliards portant sur 20 ans ; (ce qui est fort modeste en regard des besoins). En ce qui concerne le gaz algérien une partie est livrée en France par méthanières mais une grande partie a déjà été vendue à long terme aux USA (contrats Distrigaz et El Paso) ce qui confirme la compétition qui existe déjà entre l'Europe, les USA et le Japon pour se procurer les ressources énergétiques nécessaires à leur économie.

Jusqu'à un passé récent on ne s'intéressait au gaz naturel que s'il provenait de gisement de gaz sec, le gaz provenant des gisements de pétrole brut était brûlé sur place dans des tor-

chères depuis la mise au point d'un procédé de liquéfaction on peut maintenant récupérer ce gaz ; une chaîne existe déjà entre Skidda et Fos elle permet de récupérer au lieu de brûler inutilement une partie des gazs produits dans les gisements de brut algérien. Mais il s'agit d'un gaz cher car le procédé de liquéfaction, la chaîne de transport et la regazéification forment un ensemble routeux. L'impact de cette nouvelle technique sur la production mondiale peut-être important mais son incidence n'est pas encore mesurée avec précision ; son développement dépendra du prix du pétrole, si ce dernier continu à croître, il n'est pas exclu que les productions du golfe Persique puissent constituer un appoint important à l'échelle mondiale. En tous cas, il est satisfaisant de penser que ce gaz naguère brûler en vain pourra sans doute dans l'avenir être récupéré et utilisé.

Aux USA la progression de gaz naturel est considérable ; pour des raisons économiques le prix du gaz américain a été maintenu très bas de sorte que la rémunération du capital étant insuffisante celui s'investit ailleurs et il faut de plus en plus faire appel à l'importation. Des négociations commerciales très importantes sont en cours depuis plusieurs mois entre les USA et l'URSS concernant la livraison de quantités importantes de gaz soviétique ; l'issue de ces négociations semble incertaine pour le moment.

En tenant compte des retards possibles et des délais de mise en route de chacune des chaînes on peut envisager un trafic mondial de 50 milliards de m³ en 1978 et 160 m³ en 1985 mais ceci suppose la construction importante d'une flotte de méthaniers,

au 1 Juillet 73, la flotte mondiale de methaniers était composée de 14 navires et 40 batiments étaient commandés :les prévisions de trafic prévoient la mise en service entre 1978 et 85 de 85 méthaniers supplémentaires. Sans évoquer le coût des usines de liquéfaction on peut avoir une idée de ce que coutera la construction et l'entretien d'une telle flotte frigorifique. Tout ces éléments convergent pour augmenter notablement le prix du pétrole.

CHAPITRE III

LES ENERGIES NOUVELLES (autres que nucléaires).

Par énergie nouvelle nous entendons toutes celles qui pourraient se substituer éventuellement aux sources d'énergie fossiles ou nucléaires. Il est bien évident que la substitution n'est pas possible dans tous les domaines de sorte qu'il s'agit bien souvent de mettre au point des techniques nouvelles pour utiliser ces énergies. Nous étudierons successivement :

- l'énergie des mers,
- l'énergie éolienne,
- l'énergie solaire,
- les énergies de la Terre,
- les systèmes énergétiques utilisant l'Hydrogène.

III. 1 - L'ÉNERGIE DE LA MER

Nous distinguons 2 sortes d'énergie d'origine marine :

- l'énergie thermique des mers,
- l'énergie marémotrice.

III.1.1 - L'énergie thermique des mers

Le principe consiste à essayer de tirer profit de la différence de température existant entre les couches d'eau superficielle très chaudes et les couches d'eau profondes à basse température. On sait que des essais mettant en oeuvre cette technique furent entrepris par G. Claude à Abidjan où existe une lagune dont la tempé-

entre le fleuve est de l'ordre de 20 à 30 . Il s'agit d'utiliser la différence de température existant entre cette lagune et celle de l'eau du fleuve. La lagune a 430 mètres de profondeur à 4 km environ de la mer.

Il est évident que même si le principe de faire le contraire de ce qu'il se passe dans la lagune ne peut-être que très limité, il existe quelques possibilités (de l'ordre de 1 à 4) mais les possibilités sont limitées.

- 1) la production de combustible,
- 2) la production d'eau douce
- 3) la lutte contre la pollution,

Malgré tout, le développement de ce processus ne peut pas être d'application facile à court terme car les sites potentiels d'être utilisés sont peu nombreux et le prix de revient de l'installation est trop élevé ; c'est pour cette raison que le projet de G. Claude fut abandonné.

Il est évident que le projet doit être sur des sites spécifiques et doit être à plus long terme.

111.11 - Énergie marémotrice.

L'énergie marémotrice utilise la variation de hauteur du niveau de la mer au fur et à mesure des marées. Cette variation change fortement de lieu selon les sites. Mais certains sites existent, en particulier en France sur l'estuaire de la Gironde où les variations

atteignent une dizaine de mètres mais également au large et au large jusqu'à présent seule une installation importante a été réalisée ; c'est l'usine marémotrice de la Rance. La autre projet plus ambitieux a été étudié ; il prévoit de rentiller les côtes de la forme depuis le Cotentin jusqu'aux îles Chausey, par une série de digues fermant bassins de l'ordre de 100 km de longueur. Ils videraient successivement les uns dans les autres produisant en total une énergie d'environ 32 milliards de kWh par an, soit l'équivalent d'une production de 10 centrales de 1000 MW par an. Mais il n'y a de aucune sorte. Les principales difficultés techniques et économiques de ce projet sont les suivantes :

1) Comment calculer le prix du courant électrique et comment les comparer avec celui ayant d'autres origines. La rentabilité d'une telle construction est très grande, quel taux d'actualisation faut-il adopter ? Veut-on amortir l'usine en 20 ans ou en 100 ans ? De sorte que la rentabilité d'un tel projet est difficile à définir, ce qui en retarde l'adoption.

2) L'énergie produite est intermittente, elle ne peut donc venir qu'en complément d'autres sources d'énergie. On est en fait que l'on peut accepter une intermittence d'une dizaine de % de la puissance du réseau électrique, or en l'an 2000 le réseau français devrait atteindre 200 GW. La France pourrait alors y raccorder facilement une telle installation à cette époque (il faut une quinzaine d'année pour réaliser un tel projet). Malheureusement les taux d'intérêt de l'argent sont tels qu'actuellement ce projet ne retient pas l'attention des autorités responsables.

de la production d'énergie électrique. Les techniques de tels types de piles sont en cours de développement. Elles résident dans la mise au point de nouvelles électrolytes conductrices et de façon générale de nouvelles électrodes conductrices.

3.1.2. Énergie solaire

Le soleil est la source d'énergie la plus utilisée par l'homme : elle représente environ 99,97% de l'énergie existante. L'EDF a financé, en 1974, le projet de la station de la Grande Azil, une Azilienne de 1000 kW, financée par le Ministère de l'Énergie pendant 4 ans en vue de la mise au point d'un prototype de 10 MW de forme très satisfaisante. L'histoire de ce projet est la suivante : l'Azilienne concluait à une température de surface de l'ordre de 10^3 K. L'énergie électrique obtenue par effet photovoltaïque est de l'ordre d'un dixième de celle qui est convertie en chaleur, ce qui conduit à un écartement de température de l'ordre de 1000 K. Ceci conduisait à une occupation de surface de l'ordre de 10^3 m²/kW. Il est évident qu'envisager une telle occupation de surface pour proposer des études américaines de l'énergie électrique produite pour électrolyser l'eau, pour produire du gaz et l'hydrogène et l'oxygène dans une cellule électrolytique permettant d'obtenir un débit énergétique constant de l'ordre de 1000 kW, est totalement et absolument irréalisable. On ne peut donc pas envisager de produire de l'énergie plus convenablement.

11.3 - L'ENERGIE SOLAIRE.

L'énergie solaire jouit actuellement d'une grande faveur dans l'opinion publique qui y voit un remède à la pénurie d'énergie et à la pollution. Cette énergie est évidemment intermittente et dans une certaine mesure aléatoire (dans nos régions en particulier). Elle a fait l'objet d'études très poussées aux USA et en URSS en vue des programmes spatiaux de ces 2 pays. Il est hors de doute que des solutions valables et fiables ont été trouvées au point mais elles sont très onéreuses et ont un rendement faible : elles ne permettent pas des productions massives d'énergie. Il ne faut pas cependant en écarter un certain nombre à l'échelle domestique local dans le futur, s'il est possible d'en faire baisser les prix de revient.

Pour remédier à l'intermittence de la production, on peut évidemment coupler le générateur d'énergie d'origine solaire soit avec un réseau électrique existant soit utiliser un stock d'énergie et un système de conversion. Une solution élégante de ce type que celle évoquée précédemment consiste à électrolyser l'eau puis à stocker l'oxygène et l'hydrogène pour les brûler ensuite de façon régulière ; une autre solution d'intérêt plus prospectif envisage d'utiliser l'énergie solaire pour faire croître rapidement des algues qui au cours de leur fermentation produisent du méthane (il s'agit en quelque sorte de la production de gaz naturel à grande vitesse). L'un des handicaps le plus sérieux de l'énergie solaire est la grande surface des aérifères nécessaires à la captation des radiations solaires. Les ordres

de profondeur sont les suivants, il faut environ de 20 m² à 40 m² d'aériers pour produire 1KW d'énergie. On réalise ainsi très vite que pour produire les 14010¹² Watt d'énergie électrique actuellement consommé en France il faudrait recou-
vrir l'équivalent de 1.5/100 de la surface du pays (soit 10/100 à la fin du siècle)!!!. Deux études américaines relatives à l'énergie solaire méritent d'être mentionnées.

L'une est relative à la conversion directe de l'énergie solaire, l'autre met en œuvre des satellites pour capter l'énergie solaire. Selon la première étude, il a été calculé que si l'énergie solaire tombant sur 14% des régions désertiques des USA était collecté avec grande efficacité elle pourrait être transformé en 1000 GW d'énergie. Pour atteindre ce but le promoteur envisage de développer des surfaces ayant un très grand pouvoir d'absorption et un pouvoir émissif très faible dans l'infrarouge (La mise au point de ces surfaces sera certainement délicate).

L'énergie diurne serait en partie stockée dans des sels fondus à 750°C et elle serait restituée au fur et à mesure des besoins. Une installation de 1000 MW nécessiterait un stockage de sels fondus de 1400 mètres cubes (ce qui pose des problèmes de sécurité sérieux) ; le rendement énergétique d'une telle opération serait de 30 % et son prix de l'ordre de 1 Milliard de \$ (5 fois le prix actuel d'une centrale nucléaire de même puissance) mais par contre le prix de l'énergie produite serait très bon marché (aucun frais de combustible). La surface totale des collecteurs serait de l'ordre de 3,5 km².

La 2eme étude utilise le processus suivant. Un satellite placé sur une orbite située à 40 000 km au-dessus de la terre recevrait les rayons solaires en permanence. Des cellules solaires (qu'il faudrait développer industriellement) collecteraient l'énergie solaire directement en électricité avec un rendement de 15 à 20 % ; l'électricité produite serait ensuite convertie (dans le satellite!!) en énergie électromagnétique avec une efficacité de 85 % (ce qui paraît possible aujourd'hui) et transmise directement sur la Terre : (la longueur d'onde à utiliser pour cette transmission doit permettre de traverser les nuages sans trop de pertes). Le promoteur de cette idée a calculé qu'une station de 10 GW (suffisante pour alimenter actuellement New York par exemple) nécessiterait des collecteurs solaires ayant une surface de 160 000 m² (un carré de 400 mètres de côté). L'antenne héliocentrique au sol aurait une surface équivalente à 6 fois celle d'une centrale thermique classique de puissance équivalente). Le prix d'un tel dispositif serait de 500 \$ ~~le~~ KW (le double du prix du KW nucléaire actuel) et le poids d'un tel satellite serait de 2500 tonnes. (Le prix de la navette spatiale nécessaire à la construction de ce dispositif n'est pas inclus).

On a souvent écrit que l'énergie solaire n'était génératrice d'aucune pollution, c'est inexact car si on la capte l'albedo local de la terre est altéré et les conditions climatiques en sont certainement affectées. Si elle n'est pas encore techniquement prête à des productions industrielles, elle peut certainement être une énergie d'appoint, et être mise à profit pour des productions locales.

11.4 - LES ENERGIES DE LA TERRE

- l'énergie géothermique,
- l'énergie de géopression.

11.4.1 - L'énergie géothermique.

Il s'agit de la chaleur contenue à l'intérieur de la Terre, sous la croûte terrestre à une profondeur moyenne de quelques dizaines de kilomètres, la température du magma dépasse 10 000°C. L'énergie géothermique est présente partout, elle représente une réserve d'énergie de 7500 MW/an/km². A partir de la surface du sol le gradient géothermique est de l'ordre de 1°C/30 mètres mais il est dans des régions où cette valeur est beaucoup plus élevée en particulier dans les terrains d'activité volcanique ancienne ou récente.

On distingue plusieurs types de gisements géothermiques :

- a) les systèmes hydrothermaux convectifs à phase vapeur où d'importants volumes de roches perméables sont le siège de mouvement convectifs de vapeur d'eau à des températures souvent supérieures à 200°C emprisonnés sous une couverture de roches imperméables.
- b) les systèmes hydrothermaux à phase liquide à température moins élevée,
- c) les systèmes en roches imperméables chaudes, sèches où le fluide froid injecté se réchauffe en circulant dans un réseau de

factures artificiellement crees avant d'être pompé en surface.
d) les systèmes magmatiques où l'on exploite directement la chaleur
d'une chambre magmatique.

De tous ces systèmes seuls les deux premiers sont à un
stage de développement avancé ayant déjà fait l'objet de réali-
sation industrielles. Actuellement, les gisements du premier
type sont exploités pour la production d'électricité tandis que
les seconds utilisent directement les eaux chaudes pour des usages
domestique, industriel, agricole. La production d'électricité à
partir d'eaux chaudes par l'intermédiaire de fluides organiques
est à l'étude.

En 1973 la puissance électrique géothermique installée
est de 1000 MWE dont 40% en Italie, 30 % aux USA, 17 % en Nouvelle
Zélande, 7,5 % au Mexique, 3,7 % au Japon et à Salvador 0,06 % en
URSS, 0,03 % en Islande. En France, la ville de Melun chauffe
actuellement 1900 logements grâce à une source d'eau chaude cap-
tée à proximité ; il n'est pas exclu que d'autres possibilités
existent dans le bassin parisien. Le potentiel de l'énergie
géothermique est immense pour un certain nombre de pays dans
le monde, cette énergie constituera vraisemblablement la source
principale d'énergie dans les prochaines décennies (certains pays
d'Amérique du Sud par exemple). Aux USA un effort considérable
est prévu dans ce sens selon l'importance des ressources financiè-
res consenties, la puissance installée pourrait atteindre 20 %
du total de l'énergie consommée aux USA en l'an 2000.

L'énergie géothermique est peu polluante, et son prix de revient devrait être comparable à celui de l'énergie fossile malheureusement, l'Europe ne semble pas disposer de ressources géothermiques importantes. Les ressources italiennes sont déjà bien exploitées mais peut-être les régions volcaniques du Sud de l'Italie pourraient faire l'objet de prospections et d'études particulières. En France quelques zones semblent mériter une attention particulière : l'Alsace où 2 sondages de 2000 mètres pourraient être effectués et une petite centrale pilotée de 1MW,

le Massif Central pourrait faire l'objet d'un inventaire détaillé.

Enfin, des essais de système de type b (géotherme ou roches riches) pourraient être entrepris à la suite de forage très profond (5 à 6000 m). A titre complémentaire, citons que dans les départements et territoires d'Outremer, la prospection des sous-sols est prévue à la Guadeloupe, à la Réunion et aux Nouvelles Zébrides.

Pour conclure, on retiendra que l'énergie géothermique tout au moins pour certains pays devrait permettre une production énergétique intéressante et importante.

III.4.2 - L'énergie de géopression

Cette énergie existe sous forme d'eau chaude comprimée à de fortes pressions : ces formations sont constituées de sédiments gorgés d'eau qui ont été recouverts de couches imperméables

avant d'avoir évacué leur eau.

On connaît de telles formations aux USA (250 000 km² en Louisiane et au Texas) où la pression peut atteindre 300 kg/cm² pour des puits de l'ordre de 4000 mètres, en outre l'eau sous haute pression contient du méthane dissous de sorte que l'on peut espérer récupérer 3 sortes d'énergies :

- l'énergie de néopression
- l'énergie calorifique
- le méthane.

en récupérant toutes ces sortes d'énergie on espère qu'un puits pourrait produire 16 MW pendant 40 ans, avec un affaissement d'un mètre sur 1500 km². L'extraction de l'eau sous-pression conduit à un affaissement général des terrains ; cette astreinte est très importante de sorte que dans le meilleur des cas, on ne peut pas espérer récupérer plus de 100 MW pour 1500 km² de surface ; ce qui limite beaucoup l'intérêt de cette énergie. Lorsque la technique des travaux sous marins le permettra, on pourra peut être songer à des exploitations sous marines qui ne souffriraient pas du même inconvénient (mais le coût en serait notablement accru).

D'après une étude américaine, l'énergie de néopression serait d'un coût comparable au thermique classique en investissement et d'un prix de revient très bas (cependant nous n'avons pas eu connaissance de l'étude économique). Elle est certainement très peu polluante.

Pour conclure il ne semble pas que l'énergie de géopressions soit susceptible de devoir apporter une aide énergétique massive dans le futur, même si le progrès des connaissances techniques et géologiques est sensible dans les décades à venir.

II.5 - L'EMPLOI DE L'HYDROGENE

De nombreuses études envisagent un emploi de l'hydrogène comme vecteur énergétique. Ils y voient les avantages suivants :

- l'hydrogène peut être produit à partir de l'eau ,
- il peut servir à des usages énergétiques et non énergétiques, (en pétrochimie, en chimie et dans l'industrie comme gaz réducteur)
- son introduction sur le marché énergétique peut être progressive et utiliser la plus grande partie des installations existantes concernant la distribution du gaz naturel,
- sa mise en oeuvre n'est pas polluante.

La production de l'hydrogène peut s'effectuer

1) suivant la réaction $H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$

Cette réaction doit s'effectuer à hautes températures et peut utiliser divers catalyseurs. Il est envisagé que la chaleur nécessaire à cette réaction puisse être produite à partir d'un réacteur nucléaire à haute température.

2) par hydrolyse de l'eau.

Dans les 2 cas, l'oxygène produit peut avoir de nombreuses applications. Quelques installations semi industrielles existent déjà en Allemagne et aux USA, le stockage de l'hydrogène peut s'effectuer selon les mêmes procédés que ceux utilisés pour le gaz naturel et les canalisations en service peuvent être utilisées. On utilise déjà à Paris un gaz à usage domestique qui contient 80 % d'hydrogène sans problèmes particuliers. Outre les possibilités énergétiques l'hydrogène peut trouver de nombreuses utilisations en chimie. Sa consommation actuelle dans le monde est d'environ 200 milliards de m³ dont 40 milliards en Europe. Cette consommation sert à :

- la synthèse de l'ammoniac (NH₃)
- la fabrication du méthanol CH₃OH
- l'hydrogénation, l'hydrocracking et l'hydroquifurants
- la fabrication de produits organiques spéciaux
- comme combustible

On entrevoit de nombreuses autres applications pour l'avenir.

En conclusion, il semble que dans l'avenir, l'usage de l'hydrogène puisse présenter un intérêt certain par suite de sa souplesse d'envoi, sa pénétration progressive sur le marché, ses possibilités d'utilisation en chimie et en métallurgie (Certains parlent d'une civilisation de l'hydrogène). Toutefois sa pro-

duction de façon rentable et abondante exige une source de chaleur élevée que seules les réacteurs nucléaires semblent être en mesure d'atteindre.

III.6 - LES PILES A COMBUSTIBLE

Le principe de la pile à combustible est connu depuis longtemps. La mise en oeuvre ne date que d'une vingtaine d'années. Elles sont concentrées aux USA dans des sociétés privées, Pratt et Whitney effectuent l'essentiel des recherches et s'est constitué un monopole. En France, les recherches sont menées par la CGE, qui vise l'utilisation du méthanol et l'hydrazine, par l'Institut Français du pétrole qui vise l'emploi de l'hydrogène et par le Gaz de France qui recherche l'utilisation directe du gaz naturel.

La pile à combustible est essentiellement un générateur électrochimique qui transforme l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique ; à la différence des accumulateurs, ses électrodes ne se détériorent pas de sorte que l'autonomie ne dépend que des réserves de combustibles disponibles. Elle possède un bon rendement (40 à 80 % suivant la décharge), par contre, leur poids est généralement élevé et leur prix est loin d'atteindre la compétitivité.

La pile à hydrogène paraît actuellement la plus prometteuse, le rapport puissance / poids est de l'ordre de 200 W/kg. L'utilisation des bouteilles d'hydrogène (particulièrement légère 44 kg pour 10 m³ TPN permet d'atteindre un poids de l'ordre

de 300 W/kg ce qui est relativement proche des moteurs à explosion des automobiles (500 à 1000 W/kg) pour une autonomie de 10 heures. Mais la solution de choix vers laquelle on tend est le stockage de l'hydrogène sous forme d'hydruure plus léger et plus sûr d'emploi que les bouteilles de gaz ; on espère alors atteindre 1000 W/kg et les stations d'essence seront alors remplacées par des stations d'hydruure !!! Quant au prix, on pense qu'il se situera entre 500 et 100 F/Kw et qu'il pourrait s'abaisser vers 200 F/Kw. L'IFP a effectué une étude montrant qu'il était possible de transporter 4 personnes + 20 kg de bagage à 60 km/h sur 200 km avec une Renault 4L climatisée. Le prix d'une telle voiture serait supérieur de 40 à 50 % à celui d'une voiture normale et le prix du combustible hydrogéné serait supérieur d'un facteur 2 au prix de l'essence.

Il n'est pas exclu de penser que si le prix du pétrole brut continue son ascension, la voiture électrique utilisant une pile à combustible à un avenir possible à relativement court terme, au moins en zone urbaine. Une telle voiture parfaitement silencieuse ne serait en outre absolument pas polluante.

Il existe également d'autres applications possibles ; Pratt et Whitney aux USA envisagent le couplage des piles à combustible à hydrogène sur le réseau aux heures de pointe ; en milieu rural isolé, les piles à hydrogène pourrait également trouver des emplois, enfin on pensé à la propulsion des petites embarcations.

On saura dans quelques années si les efforts actuels en matière de pile à combustible industrielle à grande puissance (26 MWE) seront couronnés de succès (ou bien n'aboutiront pas) car les électriciens américains viennent de décider de quadrupler leurs efforts dans ce domaine ; il serait étonnant qu'il n'en sorte rien de positif.

III.7 - CONVESSIONS MAGNETO HYDRODYNAMIQUE ET THERMOELECTRIQUE

Ainsi qu'on l'a rappelé précédemment, la conversion magnétohydrodynamique (MHD) est un mode de conversion directe de la chaleur en électricité, un gaz chaud ionisé traverse à grande vitesse l'espace compris entre 2 électrodes. Si un champ magnétique existe entre les 2 électrodes, un courant électrique prend naissance entre ces électrodes qui peuvent alors alimenter un circuit extérieur. La conversion thermo électrique (TE) est un mode de conversion directe de la chaleur en électricité entièrement statique; elle utilise le principe suivant, une paroi métallique est fortement chauffée sous vide et de ce fait émet des électrons, si l'on place une paroi froide en regard, une puissance électrique peut être fournie si l'on referme le circuit. L'utilisation industrielle, de ces 2 modes MHD et TE consiste à inclure un étage MHD ou TE entre une source de chaleur à température élevée et l'entrée d'un étage thermique classique à température moyenne. Ce processus permet d'augmenter le rendement électrique global et par suite de diminuer la pollution thermique. On peut aussi espérer faire passer le rendement thermique d'une centrale génératrice d'énergie de 40 % environ à 55 %. Mais la MHD comme

La II. utilisent toutes deux des gaz à haute température de l'ordre de 1500°C et les seules sources permettant d'atteindre industriellement de telles températures sont les réacteurs nucléaires. A haute température pour l'instant ils n'atteignent que 750°C mais on prévoit l'étape prochaine à 1000°C Il a été dit précédemment que l'une des difficultés majeures de la MFH est la corrosion par suite de la nécessité d'ensemencer le gaz chaud animé d'une grande vitesse avec des corps qui s'ionisent facilement afin de créer les ions et les électrons nécessaires. On utilise généralement le potassium, il faut enfin créer un champ magnétique intense pratiquement produit par des enroulements supraconducteurs.

En ce qui concerne la TE les difficultés technologiques semblent moins aigües et les températures peuvent sembler être plus basses (1200°C) les américains font un effort important dans ce domaine.

III.8 - STOCKAGE D'ENERGIE

La nécessité de pouvoir stocker facilement de l'énergie et de la restituer aux moments où son usage est le plus impératif est bien connue (accumulation électrique, volant cinétique, pompage hydraulique dans des réservoirs situés en altitude etc...) La disposition d'une réserve énergétique adéquate permet dans bien des cas de réduire le coût de la production et du transport de l'énergie. On a ainsi envisagé le stockage thermique. Il s'agit de garder en réserve dans des réservoirs calorifiques de grandes quantités de fluide (liquide ou gazeux)

Lors de l'utilisation un échangeur permet de récupérer l'énergie calorifique stockée pour actionner des générateurs adéquats. De nombreux fluides ont été examinés, leur nature varie suivant les usages auxquels on s'intéresse (satellite, sous-marins etc...) mais en ce qui concerne la production massive d'énergie, seul le Li^+ qui permet de stocker 780 Wh/kg paraît avoir un avenir possible.

CHAPITRE II

LA POLITIQUE ENERGETIQUE AMERICAINE DANS LES ANNEES 1940-1950

IV.1 - LE RAPPORT AU PRÉSIDENT NIXON

Le 29 Juin 1973, le Président Nixon demandait à son administration la préparation d'un rapport passant en revue les diverses activités de recherches et de développement du secteur énergétique américain aussi bien public que privé et faisant des recommandations permettant d'élaborer un plan quinquenal énergétique américain doté de 10 milliards de \$ devant commencer à entrer en vigueur au début de l'année fiscale 1975. (c'est à dire en Juillet 74).

Ce programme est actuellement en discussion devant les diverses commissions américaines, il est sans doute trop tôt pour savoir s'il sera entièrement adopté et sous quelle forme il sera éventuellement modifié mais il est intéressant d'analyser les principales lignes de ses recommandations.

En premier lieu, une remarque s'impose, c'est la première fois que les USA essaient de coordonner l'ensemble de leur politique énergétique (intégrant toutes les formes d'énergies actuellement envisageables). Cette remarque est faite dès les premières lignes du rapport qui met en évidence les points et objectifs suivants :

- 1) les problèmes énergétiques actuels sont dus en grande partie à l'absence d'un programme national coordonné de Recherches et de développement. Au cours des 20 dernières années. Seule l'énergie nucléaire a reçu une aide soutenue et a des

niveaux adéquats.

2) La nécessité de retrouver et de maintenir l'indépendance énergétique découle des conditions plus fondamentales sur lesquelles dues à la crise actuelle. La rarefaction universelle de l'énergie menace le développement économique des USA.

3) Les USA ont les ressources et la technologie leur permettant d'atteindre l'autonomie énergétique mais un engagement national soutenu et correctement dirigé est nécessaire pour atteindre cet objectif.

4) 5 objectifs sont nécessaires pour obtenir et maintenir l'indépendance énergétique et un effort simultané est nécessaire pour chacun. Ils concernent :

a) La préservation des ressources énergétiques, la réduction de la consommation et l'accroissement des rendements des processus de conversion énergétique.

b) L'accroissement de la production américaine de pétrole et de gaz aussi rapidement que possible.

c) L'accroissement de l'emploi du charbon, d'abord pour accroître les ressources énergétiques et ultérieurement pour remplacer le pétrole et le gaz naturel,

d) Le développement de la production d'énergie nucléaire aussi rapidement que possible en premier lieu pour accroître les ressources énergétiques et pour remplacer ultérieurement l'énergie fossile.

e) Le développement de

l'usage de ressources énergétiques renouvelables (hydraulique, géothermique solaire) et la poursuite des développements des promesses de la fusion et des centrales solaires.

5) Le programme recommandé est basé sur les connaissances scientifiques et techniques actuelles, il maximise les contributions des Recherches et du Développement aux objectifs énergétiques des USA. Même en adoptant un tel programme, 1985 est l'époque la plus rapprochée à laquelle on peut raisonnablement espérer que l'indépendance énergétique soit atteinte.

6) En 1980 le programme proposé devrait réduire les importations de pétrole à la moitié (350 millions tonnes/an) de ce qu'elles sont actuellement. D'autres mesures extraordinaires seront nécessaires afin de réduire la consommation, et d'accroître la production américaine (ou les 2) pour remplacer l'autre moitié.

7) Le budget recommandé pour atteindre cet objectif est le suivant (en millions de \$).

Objectifs	Programme de recherche et de développement pour le plan quinquenal 75-79.			Budget global de recherche et développement énergétique.	
	Total nécessaire	Fonds Privés	Fonds fédéraux	Année fiscale 1976 prévue	Année fiscale 1976 reconstruite
1. Préservation de l'énergie et des ressources énergétiques.	4940	3500	1440	123,3	166,1
2. Production de pétrole et de gaz naturel.	4960	4500	460	19,5	11,0
3. Production et utilisation du charbon.	6175	3000	3175	167,7	40,1
4. Production d'énergie nucléaire.	6340	1250	5090	117,3	731,7
5. Développement des sources d'énergie d'autoconsommation.	2085	250	1835	123	117,5
TOTAL	22500	12500	10000	889,3	1572,1

8) Il est nécessaire de mettre en place un organisme administratif pour planifier et coordonner l'ensemble du programme et diriger l'action du programme fédéral.

9) Il convient de procéder à une revue au moins annuelle du programme pour réorienter les fonds aux programmes qui en auront le plus besoin. D'accroître le programme total seulement si les réallocationssont insuffisantes pour alimenter les projets les plus prometteurs.

10) Il conviendra de tenir compte des conséquences énergétiques par le programme gouvernemental dans tous les autres domaines.

11) On maximisera l'implication du secteur privé dans la conduite des révisions et l'évaluation du programme fédéral énergétique de recherche et développement à la fois en vue d'économiser les dollars fédéraux, et pour accélérer l'application des technologies avancées.

12) Au cours de l'année fiscale 1975, un programme de fuel synthétique sera initié dans l'industrie privée grâce à des prêts et des prix garantis; il concernera la construction de plusieurs usines de production de fuel synthétique à partir du charbon en utilisant les technologies actuelles. Des ressources financières d'origine gouvernementale seront utilisées pour rassembler les informations de nature économique, ainsi que celles relatives à

l'environnement qui pourrait être utile à l'évaluation de ces nouveaux procédés.

13) Un programme d'accélération des objectifs du programme de recherche et développement sera entrepris, il se composera de Recherches sur les effets concernant l'environnement :

Recherche fondamentale	10
Développement de la main d'oeuvre	10
	<u>20</u>

IV.2 - COMMENTAIRES RELATIFS AU PROGRAMME AMERICAIN 25-80

1) Les sommes d'argent dépensées pour les recherches relatives au développement énergétiques se décomposent de la façon suivante :

objectif a) Réduction des pertes énergétiques et développement des ressources existantes.....	10
objectif b) Accroissement de la production domestique de gaz et de pétrole.....	10
objectif c) Substitution du charbon au gaz et pétrole.....	14
objectif d) Validation de l'option nucléaire.....	14
objectif e) Exploration de ressources nouvelles (solaires, géothermiques, fusion etc...)	9
TOTAL.....	100

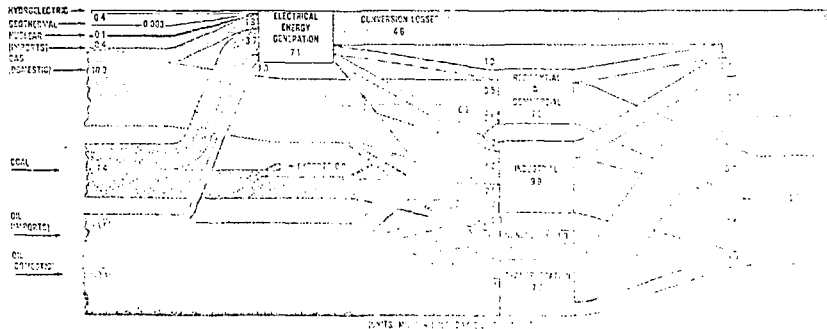
Dans ce programme les objectifs à court terme sont particulièrement privilégiés.

2) Ce programme prévoit de limiter les importations de pétrole en 1980 à 5,9 millions de barrils/jour. Les USA resteront donc encore longtemps importateur de grandes quantités de pétrole; en 1980 on prévoit la décomposition des besoins énergétiques de la façon suivante :

- énergie totale nécessaire	47	millions de barril/jour		
. amélioration des rendements				
. Énergétiques	4,7	"	"	"
. Production américaine				
de gaz et pétrole	22	"	"	"
. Production américaine				
de charbon	9,6	"	"	"
. Nucléaire	3,8	"	"	"
- énergie nouvelle	1	"	"	"
- Importation	5,9	"	"	"
	<u> </u>			
	+ 7			

Tableau XVI

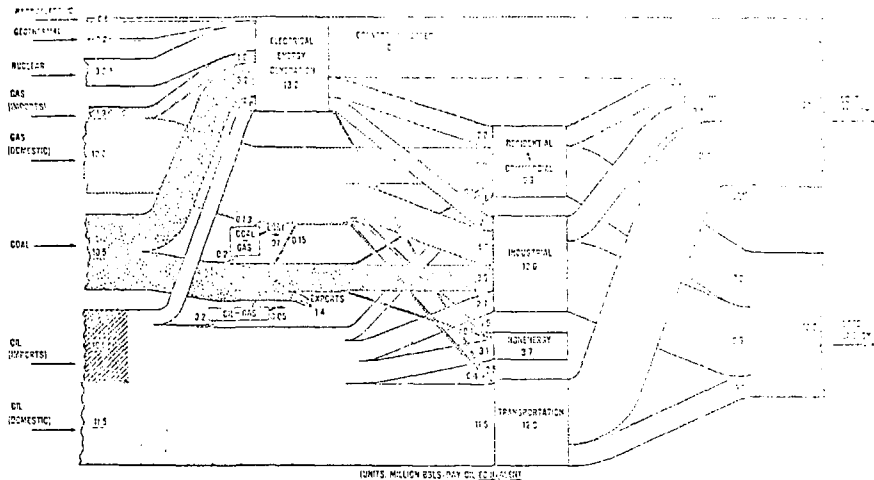
1970



SOURCE: "UNDERSTANDING THE NATIONAL ENERGY DILEMMA" 1970, 1970

104

Tableau XVII



SOURCE: "UNDERSTANDING THE 'NATIONAL ENERGY DILEMMA'," JOAS, 1973

3) L'effort principal porte sur l'emploi massif de l'énergie américaine à la place de gaz et de pétrole étrangers.

4) La demande énergétique américaine tendant à croître et les ressources étant de moins en moins nombreuses, le prix de l'énergie d'origine fossile ne peut que s'élever ; il est vraisemblable que ce prix s'établira au voisinage du coût marginal de production des ressources spécifiques. Il a été calculé que si la consommation d'énergie doublait aux USA d'ici 1980, il en résulterait une réduction de 10% des demandes énergétiques, ce chiffre s'explique par la pression très forte de la demande dans les années 70.

5) Les tableaux XVI et XVII montrent l'évolution des consommations énergétiques américaines entre les années 1970 et 1980. On y constate en particulier que le rendement énergétique tend à se dégrader. En 1970, il était de $\frac{17}{29,7} = 57\%$ et en 1980, il sera de $\frac{14,6}{32} = 46\%$.

1.10 - EXAMEN DES DIVERS OBJECTIFS.

L'objectif général vise à maximiser la participation industrielle au programme énergétique sous l'autorité de l'Energy Research and Development Administration pour coordonner l'effort national et surveiller son développement. Le rapport insiste sur la nécessité de trouver un compromis entre la nécessité de maintenir les prix et les projets à un niveau suffisant afin de stimuler l'initiative privée et le désir de protéger le consommateur contre une exploitation abusive.

Un rang de priorité a été attribué aux différents objectifs en tenant compte d'un certain nombre de critères tels que

- la validité des bases scientifiques,
- la probabilité de succès technologique,
- l'environnement (coût-conséquences)
- la rentabilité
- le temps nécessaire pour atteindre leur rentabilité donnée) enfin des critères particuliers ont été également considérés par exemple : les effets de l'environnement non inclus dans les coûts,

la sécurité nationale,
des questions politiques

et régionales.

Le rapport n'explique pas comment le classement a été fait mais il donne les résultats obtenus . Ceux-ci permettent d'effectuer le classement suivant :

Réduction des besoins énergétiques-amélioration des rendements.

Meilleure répartition des ressources énergétiques,

Stimulation de la production de gaz et de pétrole,

Procédé de liquéfaction des charbons et des schistes.

Fission

Techniques de conversion énergétique.

Système de transports avancés.

Procédés de transport de distribution et de stockage de l'énergie.

Fusion

Geothermique

Solaire

Toutes ces rubriques sont incluses dans les B et C et D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, AK, AL, AM, AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG, BH, BI, BJ, BK, BL, BM, BN, BO, BP, BQ, BR, BS, BT, BU, BV, BW, BX, BY, BZ, CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ, CK, CL, CM, CN, CO, CP, CQ, CR, CS, CT, CU, CV, CW, CX, CY, CZ, DA, DB, DC, DD, DE, DF, DG, DH, DI, DJ, DK, DL, DM, DN, DO, DP, DQ, DR, DS, DT, DU, DV, DW, DX, DY, DZ, EA, EB, EC, ED, EE, EF, EG, EH, EI, EJ, EK, EL, EM, EN, EO, EP, EQ, ER, ES, ET, EU, EV, EW, EX, EY, EZ, FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI, FJ, FK, FL, FM, FN, FO, FP, FQ, FR, FS, FT, FU, FV, FW, FX, FY, FZ, GA, GB, GC, GD, GE, GF, GG, GH, GI, GJ, GK, GL, GM, GN, GO, GP, GQ, GR, GS, GT, GU, GV, GW, GX, GY, GZ, HA, HB, HC, HD, HE, HF, HG, HH, HI, HJ, HK, HL, HM, HN, HO, HP, HQ, HR, HS, HT, HU, HV, HW, HX, HY, HZ, IA, IB, IC, ID, IE, IF, IG, IH, II, IJ, IK, IL, IM, IN, IO, IP, IQ, IR, IS, IT, IU, IV, IW, IX, IY, IZ, JA, JB, JC, JD, JE, JF, JG, JH, JI, JJ, JK, JL, JM, JN, JO, JP, JQ, JR, JS, JT, JU, JV, JW, JX, JY, JZ, KA, KB, KC, KD, KE, KF, KG, KH, KI, KJ, KK, KL, KM, KN, KO, KP, KQ, KR, KS, KT, KU, KV, KW, KX, KY, KZ, LA, LB, LC, LD, LE, LF, LG, LH, LI, LJ, LK, LL, LM, LN, LO, LP, LQ, LR, LS, LT, LU, LV, LW, LX, LY, LZ, MA, MB, MC, MD, ME, MF, MG, MH, MI, MJ, MK, ML, MM, MN, MO, MP, MQ, MR, MS, MT, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ, NK, NL, NM, NN, NO, NP, NQ, NR, NS, NT, NU, NV, NW, NX, NY, NZ, OA, OB, OC, OD, OE, OF, OG, OH, OI, OJ, OK, OL, OM, ON, OO, OP, OQ, OR, OS, OT, OU, OV, OW, OX, OY, OZ, PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PI, PJ, PK, PL, PM, PN, PO, PP, PQ, PR, PS, PT, PU, PV, PW, PX, PY, PZ, QA, QB, QC, QD, QE, QF, QG, QH, QI, QJ, QK, QL, QM, QN, QO, QP, QQ, QR, QS, QT, QU, QV, QW, QX, QY, QZ, RA, RB, RC, RD, RE, RF, RG, RH, RI, RJ, RK, RL, RM, RN, RO, RP, RQ, RR, RS, RT, RU, RV, RW, RX, RY, RZ, SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SK, SL, SM, SN, SO, SP, SQ, SR, SS, ST, SU, SV, SW, SX, SY, SZ, TA, TB, TC, TD, TE, TF, TG, TH, TI, TJ, TK, TL, TM, TN, TO, TP, TQ, TR, TS, TT, TU, TV, TW, TX, TY, TZ, UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, UI, UJ, UK, UL, UM, UN, UO, UP, UQ, UR, US, UT, UY, UZ, VA, VB, VC, VD, VE, VF, VG, VH, VI, VJ, VK, VL, VM, VN, VO, VP, VQ, VR, VS, VT, VU, VV, VW, VX, VY, VZ, WA, WB, WC, WD, WE, WF, WG, WH, WI, WJ, WK, WL, WM, WN, WO, WP, WQ, WR, WS, WT, WU, WV, WW, WX, WY, WZ, XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW, XX, XY, XZ, YA, YB, YC, YD, YE, YF, YG, YH, YI, YJ, YK, YL, YM, YN, YO, YP, YQ, YR, YS, YT, YU, YV, YW, YX, YY, YZ, ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW, ZX, ZY, ZZ, AA, AB, AC, AD, AE, AF, AG, AH, AI, AJ, AK, AL, AM, AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG, BH, BI, BJ, BK, BL, BM, BN, BO, BP, BQ, BR, BS, BT, BU, BV, BW, BX, BY, BZ, CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, CH, CI, CJ, CK, CL, CM, CN, CO, CP, CQ, CR, CS, CT, CU, CV, CW, CX, CY, CZ, DA, DB, DC, DD, DE, DF, DG, DH, DI, DJ, DK, DL, DM, DN, DO, DP, DQ, DR, DS, DT, DU, DV, DW, DX, DY, DZ, EA, EB, EC, ED, EE, EF, EG, EH, EI, EJ, EK, EL, EM, EN, EO, EP, EQ, ER, ES, ET, EU, EV, EW, EX, EY, EZ, FA, FB, FC, FD, FE, FF, FG, FH, FI, FJ, FK, FL, FM, FN, FO, FP, FQ, FR, FS, FT, FU, FV, FW, FX, FY, FZ, GA, GB, GC, GD, GE, GF, GG, GH, GI, GJ, GK, GL, GM, GN, GO, GP, GQ, GR, GS, GT, GU, GV, GW, GX, GY, GZ, HA, HB, HC, HD, HE, HF, HG, HH, HI, HJ, HK, HL, HM, HN, HO, HP, HQ, HR, HS, HT, HU, HV, HW, HX, HY, HZ, IA, IB, IC, ID, IE, IF, IG, IH, II, IJ, IK, IL, IM, IN, IO, IP, IQ, IR, IS, IT, IU, IV, IW, IX, IY, IZ, JA, JB, JC, JD, JE, JF, JG, JH, JI, JJ, JK, JL, JM, JN, JO, JP, JQ, JR, JS, JT, JU, JV, JW, JX, JY, JZ, KA, KB, KC, KD, KE, KF, KG, KH, KI, KJ, KK, KL, KM, KN, KO, KP, KQ, KR, KS, KT, KU, KV, KW, KX, KY, KZ, LA, LB, LC, LD, LE, LF, LG, LH, LI, LJ, LK, LL, LM, LN, LO, LP, LQ, LR, LS, LT, LU, LV, LW, LX, LY, LZ, MA, MB, MC, MD, ME, MF, MG, MH, MI, MJ, MK, ML, MM, MN, MO, MP, MQ, MR, MS, MT, MU, MV, MW, MX, MY, MZ, NA, NB, NC, ND, NE, NF, NG, NH, NI, NJ, NK, NL, NM, NN, NO, NP, NQ, NR, NS, NT, NU, NV, NW, NX, NY, NZ, OA, OB, OC, OD, OE, OF, OG, OH, OI, OJ, OK, OL, OM, ON, OO, OP, OQ, OR, OS, OT, OU, OV, OW, OX, OY, OZ, PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG, PH, PI, PJ, PK, PL, PM, PN, PO, PP, PQ, PR, PS, PT, PU, PV, PW, PX, PY, PZ, QA, QB, QC, QD, QE, QF, QG, QH, QI, QJ, QK, QL, QM, QN, QO, QP, QQ, QR, QS, QT, QU, QV, QW, QX, QY, QZ, RA, RB, RC, RD, RE, RF, RG, RH, RI, RJ, RK, RL, RM, RN, RO, RP, RQ, RR, RS, RT, RU, RV, RW, RX, RY, RZ, SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SI, SJ, SK, SL, SM, SN, SO, SP, SQ, SR, SS, ST, SU, SV, SW, SX, SY, SZ, TA, TB, TC, TD, TE, TF, TG, TH, TI, TJ, TK, TL, TM, TN, TO, TP, TQ, TR, TS, TT, TU, TV, TW, TX, TY, TZ, UA, UB, UC, UD, UE, UF, UG, UH, UI, UJ, UK, UL, UM, UN, UO, UP, UQ, UR, US, UT, UY, UZ, VA, VB, VC, VD, VE, VF, VG, VH, VI, VJ, VK, VL, VM, VN, VO, VP, VQ, VR, VS, VT, VU, VV, VW, VX, VY, VZ, WA, WB, WC, WD, WE, WF, WG, WH, WI, WJ, WK, WL, WM, WN, WO, WP, WQ, WR, WS, WT, WU, WV, WW, WX, WY, WZ, XA, XB, XC, XD, XE, XF, XG, XH, XI, XJ, XK, XL, XM, XN, XO, XP, XQ, XR, XS, XT, XU, XV, XW, XX, XY, XZ, YA, YB, YC, YD, YE, YF, YG, YH, YI, YJ, YK, YL, YM, YN, YO, YP, YQ, YR, YS, YT, YU, YV, YW, YX, YY, YZ, ZA, ZB, ZC, ZD, ZE, ZF, ZG, ZH, ZI, ZJ, ZK, ZL, ZM, ZN, ZO, ZP, ZQ, ZR, ZS, ZT, ZU, ZV, ZW, ZX, ZY, ZZ

1.3.1 - Objectif a

Il vise principalement à améliorer l'efficacité des processus énergétiques et porte essentiellement sur le développement de turbines à gaz, de la MHD, des matériaux résistants à hautes températures. Il admet que la recherche scientifique et technique continuera à croître dans l'énergie et que les rendements viendront de l'abolition des limites fondamentales des températures plus élevées. Il vise un accroissement de rendement général de 10% qui rappelle qu'il est actuellement de l'ordre de 50%. En ce qui concerne les transports qui utilisent environ 25% de l'énergie totale avec un rendement excédentaire de 20% il existe peu d'espoir à court terme d'améliorer les rendements. Enfin, des arrêts préviendront que les carburants doivent être calorifiques aussi bien contre la chaleur que contre le froid.

1.3.2 - Objectif b

Il concerne l'accroissement de la production américaine de pétrole et le gaz en utilisant de nouvelles techniques d'ex-

exploitation telles que l'emploi d'explosions sous terraines (nucléaires ou conventionnelles) pour stimuler la production des gisements en fin d'exploitation, l'injection de fluide dans des gisements devenus improductifs et la mise au point de procédés de forage améliorés.

Enfin, un inventaire des ressources énergétiques non encore exploitées sera entrepris.

IV.3.3 - Objectif c Cet objectif vise à substituer le charbon au pétrole et au gaz. Le programme porte sur les points suivants

- amélioration des conditions d'extractions du charbon, au point de la sécurité, de l'environnement, du rendement (30t/j/homme)
- développement industriel de combustibles synthétiques
- développement technologiques visant à améliorer les risques de pollution et à étudier la possibilité des gazéifications du charbon in situ

IV.3.4 - Objectif d . Validation de l'option nucléaire. Cet objectif reçoit un support financier important. Il comporte 2 parties principales.

A) Sécurité, enrichissement de l'Uranium, développement des réacteurs à eau.

B) Développement des réacteurs à neutrons rapides.

A) Il s'agit 1) de développer les travaux visant à l'amélioration de la sécurité de fonctionnement des réacteurs, et celle des usines

(retraitement des combustibles, stockage des déchets, solidification des principaux déchets nucléaires etc...).

2) de développer les études générales concernant l'implantation des sites nucléaires (travaux généraux d'écologie).

3) de démontrer la faisabilité des nouveaux procédés de séparation isotopique en particulier à l'aide de laser.

4) d'améliorer la technologie des réacteurs nucléaires à eau (pressurisé et bouillant).

5) de développer les cycles au Thorium et à l' U^{233} .

*) Dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides les USA ont pris ces dernières années du retard sur l'Europe et l'effort prévu dans ce domaine pour les années prochaines aux USA est très important, le 1/4 du budget général de recherche énergétique leur est consacré. Le programme prévoit que les réacteurs à neutrons rapides devraient à la fin du siècle produire environ 250 000 MWE; il s'agit essentiellement de réacteurs refroidis au sodium, les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz recevront une aide plus modeste, et les réacteurs à sels fondus feront l'objet d'une réévaluation générale de leur possibilités.

IV.3.5 - Objectif e. Il s'agit du développement des nouvelles sources d'énergie.

C'est la fusion qui reçoit la part principale de l'effort entrepris.

La fusion, qu'il s'agisse de la voie utilisant le confinement magnétique ou de celle relative à l'emploi des lasers, reste un objectif lointain. (L'intérêt de la fusion sera mis en évidence dans les chapitres suivants). En ce qui concerne l'énergie solaire l'effort principal portera sur le développement de cette énergie pour le chauffage et le refroidissement des immeubles.

L'énergie géothermique fera également l'objet de développement principalement dans le domaine de l'exploitation des sources d'énergie géothermique disponibles aux USA : on recherchera des applications possibles dans le domaine du chauffage urbain et de la désalinisation de l'eau de mer .

IV.3.6 - Programme de soutien

Un objectif supplémentaire (hors programme) concerne les effets sur l'environnement consécutifs à une extension successive de la production énergétique. Il s'agit essentiellement de

1) déterminer la nature des pollutions produites et de développer les moyens d'identification et de mesure des effets produits sur l'environnement,

2) de déterminer les moyens par lesquels les polluants sont injectés dans l'environnement et s'y propagent;

3) de déterminer les effets des pollutions sur la santé, le bien être etc...

4) de développer des standards et des spécifications permettant d'assurer la protection de l'environnement.

Ce programme comprend des recherches théoriques et expérimentales dans de nombreux domaines tels que la physique, la chimie, la biologie, la sociologie, l'économie etc...

Enfin le programme prévoit des moyens financiers pour permettre, la reconversion du personnel dans les activités jugées prioritaires, le développement de séminaires d'informations et d'éducation des responsables et du public.

IV.4 - TABLEAU RECAPITULATIF DU FINANCEMENT DU PROGRAMME AMERICAIN

Le Tableau XVIII récapitule les sources d'argent prévues pour alimenter les différents objectifs cités précédemment.

TABLEAU XVIII

Objectifs	1974	19 75	19 76	1977	1978	1979	75-79	Observations.
a) <u>MEILLEURE UTILISATION DE L'ENERGIE.</u>								
1) Réduction des pertes énergétiques								
-Immeubles		6,2	10	11	11,6	11,2	50	
-Industrie		5,4	9	14	12,8	13,8	55	
-Transport		1,8	4,2	4,5	3	1,5	15	
Systèmes intégrés (MIVS)		4,5	5	4	1	0,5	15	
Etude secteurs énergie intermédiaire		2	3,5	4	3	2,5	15	
Total partiel		19,9	31,7	37,5	31,4	29,5	150	
Modèle d'évaluation énergétique		3	3	4	3	3	16	
Technologie des systèmes nouveaux		2	2	4	4	2	14	
Critère d'évaluation des systèmes énergétiques		2	2	1	1	1	7	
Analyse des systèmes énergétiques		3	5	5	5	5	23	
Total partiel		10	12	14	13	11	60	
Total général	22,3	29,9	43,7	51,5	44,4	40,5	210	

L'accroissement des rendements énergétiques							
Turbine à gaz à haute température	18,3	66,8	79,3	76,8	73,8	315	
MHD cycles avancées au K.	7	14,5	26	20,5	22	90	
Déchets utilisés comme combustible	1,5	2,6	2,3	1,4	1,7	10	
Pile à combustible	5,5	9,5	17	21	27	80	
Concepts avancés (thermoionique)	2	2	2	2	2	10	
Technologie nouvelle	2	3	5	5	5	20	
Propulsion automobile avancée (augmentation des rendements)	53	59	59	71	58	300	
Amélioration des rendements des transports	10	19	26	30	54	139	
Air, Rail-bus;	4	5,3	6,3	9	10,4	35	
bateaux	6	8,2	4,2	5,8	6,8	31	
Amélioration transport et distribution énergie en surface	8,1	7,4	7,4	7,4	94	39,7	
Amélioration transport et distribution énergie sous terre	5,3	7,5	7,8	10	12	42,6	
Stockage	4,2	7	11,7	12,5	15,5	50,9	
Recherche de système nouveaux	2,4	3,6	4	2,9	3,9	16,8	
Amélioration des transports maritimes (méthaniers)	7	8	9	12	14	50	
Total Général	40	136,3	223,4	267	287,8	315,5	1230
Total de l'objectif	66,3	166,2	267,1	318,5	332,2	356	1440.

<u>b) Accroissement de la production de pétrole et de gaz</u>							
Récupération secondaire (injecteur de fluide)	10,7	22,4	20,5	12	4,8	70,4	
Stimulation (conventionnelle et nucléaire)	9,1	31,2	23,2	16,6	16,2	96,3	
Schistes bitumeux (conventionnelle et nucléaire)	9,3	30	30,7	29,6	28,2	127,8	
Forage avancés	2,6	5,5	5,1	1,3	1	15,5	
Total Partiel	11,2	31,7	89,1	79,5	59,5	310	
Prospection de pétrole et gaz	5,7	8,3	13	20	22	70	
Prospection d'uranium et de thorium	6,3	6,7	8	9	10	40	
Prospection de charbon	3	4	4,5	4,5	4	20	
Schistes bitumineux	1	1	1	1	1	5	
Prospection de ressources non combustibles	1	1	1	1	1	5	
Technologie générale d'exploration	2	2	2	2	2	10	
Total partiel	8,3	20	23	29,5	37,5	150	
Total général de l'objectif b	19,5	51,7	112,1	109	97	90,2	
<u>c) Substitution du charbon au pétrole et au gaz</u>							
Amélioration des procédés d'extraction	45	57	64	77	82	325	

Fusion (laser)	42,9	10	20	25	25	30	110	une au tre pa tie tr ès im portan te est payée par le budget milita re.
solaire	13,2	32,5	39,9	41,4	42,2	44	200	
géothermie	11,1	40	41	40,8	35,7	27,5	185	
Total général de l'objectif e	124	217,5	330,9	368,2	440,9	477,5	1835	
<u>Programme</u>								
<u>de support</u>								
1) <u>L'effet</u>								
<u>sur l'envi-</u>								
<u>ronnement</u>								
-caractéris-								
ation des pol-								
lutions, mesu-								
res et surveil-								
lance		13,3	18,5	21,1	21,4	22	96,3	
Déplacement								
des pollutions		20,5	24	23	23	19,5	110	
Recherche sur								
les effets des								
pollutions		69,1	76,4	78,4	95	94,8	413,7	
Développement								
des spécifica-								
tions		3	3	6	8	10	30	
Total partiel		105,9	121,9	128,5	147,4	166,3	650	
2) <u>Recherches</u>								
<u>fondamenta-</u>								
<u>les</u>								
Matériaux		8	11	12	12	12	55	
Chimie phy-								
sique		16	22	24	24	24	110	
Biologie		12	15	17	18	18	80	
Plasmas		3	4	5	4	4	20	
Mathématiques		4	6	8	9	8	35	
Total partiel		43	58	66	67	66	300	
3) <u>Améliora-</u>								
<u>tion de la</u>								
<u>qualité et</u>								
<u>la quantité</u>								
<u>du personnel</u>								
Orientation		1,5	2,4	3	3	3	12,9	

Entraînement des dirigeants	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	2,5
Support aux étudiants post graduate	1,5	2,5	4,5	5	3,5	29
Support aux laboratoires	1,5	3,5	4,5	3,8	2,3	156
Total partiel	5	9	12,5	12,5	11,2	50
Total général	153,9	188,9	206	226,7	217,5	1600
Total global	1726	2178,9	2240,4	400,6	2447,1	11000

IV.5 - QUELQUES CONCLUSIONS RELATIVES AU PROGRAMME ENVISAGE

On constate à l'examen de ce programme que l'effort principal porte sur la gazéification du charbon et sur le développement du nucléaire. Il n'est donc pas étonnant que :

1) les grandes sociétés pétrolières américaines se soient déjà assurées du contrôle du 1/3 de la production du charbon américain.

2) que ces sociétés s'intéressent de plus en plus au développement de l'énergie nucléaire sous toutes ses formes,

3) que ces mêmes sociétés cherchent à se désengager à moyen et à long terme dans le Moyen Orient afin d'utiliser leur capitaux vers des secteurs qui risquent de devenir plus rentables (nucléaire en particulier).

Le programme prévu est très logique ; seule l'énergie nucléaire est susceptible de satisfaire les besoins énergétiques de l'avenir en outre les consommations d'énergie électrique paraissant avoir des chances de continuer à s'accroître, le nucléaire s'en trouve privilégié. Il est des secteurs où le nucléaire ne semble pas être en mesure de se substituer au combustible fossile (transport aérien, et automobile) dans d'autres au contraire tels que le transport maritime il faut s'attendre à un débouché important des chaudières nucléaires. Il est prévu aux USA que 60 % de l'énergie consommée aux USA sera en l'an 2000 d'origine nucléaire (elle n'est que 5 % actuellement). Cette évolution va entraîner une restructuration importante de l'industrie américaine. Il existe

quant à la société Exxon, elle cherche à acquérir une position dominante dans la fabrication des combustibles, elle s'intéresse en outre à des technologies de pointe comme la séparation isotopique par laser.

Il est donc vraisemblable

1) qu'aux USA la production d'énergie nucléaire va se concentrer entre les mains de quelques grandes sociétés dépendant d'un petit nombre de groupes financiers très puissants,

2) que ces sociétés à vocation énergétique multiple vont également développer sur une grande échelle la gazéification du charbon américain, 10 usines sont prévues en 1985 et 210 en l'an 2000 ; il est pas exclu que les USA deviennent à terme exportateur d'une certaine quantité de ces combustibles de synthèse,

3) la production d'énergie étant très capitaliste l'industrie américaine sera vraisemblablement contrainte de se concentrer d'avantage encore ce qui risque d'avoir une influence profonde sur la situation européenne.

4) le programme énergétique américain est accompagné d'un programme de soutien destiné principalement à étudier les effets sur l'environnement un effort très important sera certainement entrepris en vue de développer l'écologie et l'information du public.

5) il semble que la politique énergétique américaine cherche à se rationaliser et que l'Etat soit décidé à y jouer un rôle plus important que par le passé. Si cette tendance se confirme, il peut en résulter une évolution des structures sociales et économiques américaines ; un "certain dirigisme" de type européen peut ainsi apparaître progressivement, mais il sera certainement lié aux activités des sociétés multinationales.

C H A P I T R E V

L'ENERGIE NUCLEAIRE (FISSION)

V.1 - INTRODUCTION

L'énergie atomique est européenne de naissance (Joliot-Curie, Otto Han, Enrico Fermi, Hans Bethe, Chackwick, Heisenberg, tous de nationalité Européenne, comptent parmi ses promoteurs les plus éminents. Elle fut ensuite américaine d'adoption, puis russe, avant de revenir dans son Europe natale. Son adolescence se développe en pleine guerre aux USA dans un contexte qui lui permit, certes, un développement extrêmement rapide, mais la marque profondément. La conjoncture de l'époque fit que l'on s'intéressa d'abord à ses applications militaires. Les Etats-Unis dépensèrent, sans compter, mobilisant les meilleurs physiciens, et ne reculant devant aucune difficulté technique (pourtant considérables). Lorsque avec le recul du temps on regarde cette époque, on est à la fois saisi d'admiration devant l'ampleur des travaux entrepris et menés à bien, avec le succès que l'on connaît, (dans des délais particulièrement courts), et un peu déçu par la conduite de l'humanité qui semble n'être capable de s'organiser que face au danger et sous la contrainte. Des problèmes beaucoup plus simples que ceux qui ont été résolus à cette occasion pourraient l'être aujourd'hui avec un minimum de consensus et une organisation beaucoup moins contraignante que celle qui dût alors être mise en place, (les méfaits de la pollution ne constituent que l'un des exemples que l'on pourrait citer à ce sujet). A l'époque de la dernière guerre, seuls les USA avaient les moyens et les méthodes permettant d'aboutir. Car les moyens, comme on le verra, sont énormes et les méthodes conduisent à adopter des changements profonds dans les habitudes de travail et de vie.

Avec l'énergie nucléaire, on rentre dans un monde nouveau, où les problèmes se posent en des termes totalement différents de ceux auxquels la plupart d'entre nous sommes habitués avec des échéances différentes et des ordres de grandeur d'autre nature.

V.2 - RAPPEL DE PRINCIPE.

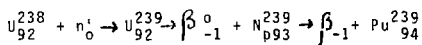
L'énergie de fission trouve son origine dans la rupture des noyaux lourds possédant un grand nombre de nucléons comme l'uranium, ou le plutonium. Cette fission est provoquée à la suite d'un intense bombardement neutronique des noyaux fissiles ; l'absence de charge électrique des neutrons leur permet de franchir sans obstacle les barrières de potentiel coulombiennes entourant les noyaux ; l'addition d'un neutron supplémentaire à un édifice nucléaire qui en contient déjà beaucoup (143 neutrons et 92 protons pour l'uranium 235) provoque, dans certains cas, la dislocation du noyau bombardé ; celui-ci se casse généralement en 2 fragments animés d'une grande vitesse, et libère en moyenne 2,5 neutrons ayant une énergie de l'ordre du MeV ; ces neutrons nouvellement émis, en nombre supérieur à celui nécessaire à provoquer la fission, permettent de produire ultérieurement la fission d'autres noyaux voisins, c'est le phénomène de réaction en chaîne dans lequel le neutron initial créant la fission donne naissance à 2,5 neutrons susceptibles de produire d'autres fissions. Le ralentissement des fragments de fission produit, lors de la rupture du noyau de matière fissile chauffe le milieu dans lequel ils se propagent ; la chaleur est alors extraite par un fluide

caloporteur (eau, gaz, sodium par exemple) . Pour éviter que la réaction ne s'emballé (ce que l'on recherche au contraire dans les applications militaires) il faut disperser la matière et la disposer, sous forme de "réseaux" dans des empilements qui constituent le "cœur" des réacteurs nucléaires. La multiplication neutronique ne se maintient que si l'on rassemble une certaine quantité de matière fissile, car les neutrons produits lors des fissions ne servent pas tous à reproduire d'autres fissions, certains disparaissent dans des captures parasites dans les matériaux de structure, d'autres s'échappent à l'extérieur de l'empilement (il faut alors les capturer dans des protections adéquates) de sorte qu'il faut pour qu'un réacteur puisse fonctionner, que l'on dispose d'une certaine quantité de matière fissile (une masse critique), au-dessous de laquelle il est impossible que les réactions s'entretiennent d'elles-mêmes. Le calcul d'un réacteur nucléaire est donc avant tout une question de bilan neutronique ; ce dernier est particulièrement fragile ; au-dessous d'un certain seuil, rien ne fonctionne, au-delà d'un autre seuil, il devient difficile de contrôler l'évolution de la multiplication neutronique. Ces problèmes sont de nos jours parfaitement maîtrisés.

Tous les noyaux ne sont pas fissiles, dans les conditions les plus courantes, seul l' U_{235} est susceptible de subir le phénomène de fission à l'aide de neutrons de basse énergie ; l' U_{238} est très peu fissile, en outre, il ne l'est qu'avec des neutrons de grande énergie. On sait que l'U naturel est composé de 2 isotopes : l' U_{235} et l' U_{238} à raison de 1 noyau d' U_{235} pour 140

noyaux d' U_{238} .

Les autres noyaux fissiles n'existent pas à l'état naturel (leur période de décroissance radioactive ne le leur permet pas); parmi les noyaux fissiles artificiels les plus connus, le plutonium est particulièrement intéressant car sa probabilité de fission est plus grande que celle de l' U_{235} et il se produit lors de l'irradiation neutronique de l' U_{238} (après une chaîne de décroissance radioactive rappelée ci-après



Cette possibilité conduit alors à se poser la question suivante : Pourrait-on imaginer un dispositif tel que, d'une part des fissions s'y développent, produisant ainsi de l'énergie, d'autre part, certains neutrons non utilisés pour entretenir les fissions soient capturés par l' U_{238} et produisent du plutonium. ?

Un tel dispositif serait à la fois générateur d'énergie et producteur de noyaux fissiles.

Cette possibilité existe et ces réacteurs sont désignés couramment sous le nom anglo saxon de "breeder" ou encore de "réacteurs à neutron rapides", car ils ne peuvent se concevoir qu'en mettant en oeuvre des neutrons de grande énergie, dits neutrons rapides (cette énergie est bien entendu inférieure à celle que possède les neutrons nés lors de la rupture de noyaux).

De sorte que 2 grandes voies de développement apparaissent: dans l'une, les neutrons issus des éléments fissiles à l'état rapide (2,5 MeV) se ralentissent dans un milieu peu capturant, s'y mettent en équilibre thermique, deviennent des neutrons appelés "thermiques" et reproduisent des fissions sur d'autres éléments fissiles voisins ; au cours de ce ralentissement, un certain nombre de neutrons s'échappent de sorte que le breeding est impossible. (C'est la famille des réacteurs à neutrons thermiques)., dans l'autre les neutrons issus des éléments fissiles à l'état rapide se ralentissent aussi peu que possible, les fuites neutroniques sont réduites au minimum, et le breeding est possible.

Cette présentation un peu schématique n'est pas exactement en accord avec la physique nucléaire mais elle définit assez simplement les 2 possibilités principales des réacteurs nucléaires. (En fait, le breeding thermique est possible avec le Thorium mais cette possibilité n'est pas encore utilisée efficacement actuellement).

Dans un breeder, l'énergie provient finalement de la transformation de masse des noyaux ; c'est une application directe du principe d'Einstein $E = mc^2$. On remplace un noyau lourd par des noyaux plus légers (produits de fission) et on reproduit un noyau fissile grâce aux neutrons excédentaires. Ces breeders existent ; ils fonctionnent (la France tient dans ce domaine une place honorable) ; on peut alors s'étonner d'entendre parler de crise de l'énergie, puisque nous disposons de moyens comme les réacteurs nucléaires à neutron rapides qui peuvent fournir de

l'énergie, tout en reproduisant une fraction très importante du combustible qu'ils consomment.

V.3 - QUELQUES ORDRES DE GRANDEURS

Afin de montrer à quel point l'énergie nucléaire modifie les ordres de grandeur auxquelles nous sommes couramment habitués, examinons le problème suivant :

Déterminons la consommation de combustible d'une centrale nucléaire de 1000 MWE et comparons cette valeur avec celle relative à une centrale à fuel :

Lors de la fission, les fragments de fission emportent sous forme d'énergie cinétique la grande majorité de l'énergie produite. Ces fragments de fission se ralentissent très vite à l'intérieur même de l'élément fissile, celui-ci s'échauffe; il faut alors extraire l'énergie calorifique produite par un fluide caloporteur adéquat.

Il faut $3 \cdot 10^{10}$ fissions/sec pour produire une énergie égale à 1 watt/sec, comme un gramme d'uranium 235 contient environ $2,5 \cdot 10^{21}$ noyaux, on calcule facilement que la combustion de 1 g d' U_{235} par jour suffit à produire un megawatt/jour.

Soit 1 Kg d' U_{235} /jour pour 1000 Megawatt/jour ; ou avec un rendement de l'ordre de 30 % une tonne/an pour 1000 megawatts électrique pendant un an. Une centrale électrique nucléaire de 1000 MW électrique consomme donc environ 1 tonne d'Uranium 235

par an. La densité de l'Uranium étant de l'ordre de 20, le volume de l' U_{235} nécessaire est donc de 50 litres.

En pratique, on n'utilise pas de l'Uranium 235 pur, on emploie de l'Uranium enrichi en U_{235} . Un ordre de grandeur courant est voisin de 3% (au lieu de 0,7% pour l'uranium naturel, de sorte qu'une centrale nucléaire de 1000 MWe contient environ 100 tonnes d'uranium renfermant 3 tonnes d'Uranium 235 ; chaque année le tiers du combustible total est consommé.

Si maintenant on compare cette consommation avec celle d'une centrale électrique à fuel de même puissance (on a opté la correspondance 1/3 TEC=1 MW h électrique) on calcule simplement qu'il faut environ 3 millions de tonnes de charbon par an, ou 3 millions de tonnes de fuel par an pour alimenter une telle centrale. Le rapport des masses de combustible est de 10^6 !!!

La géopolitique de l'énergie est, dans ces conditions, entièrement modifiée car le stockage de plusieurs années de fonctionnement d'une centrale devient possible sans poser au un problème particulier (à part l'immobilisation des capitaux). Avec d'autres combustibles comme le Pu les ordres de grandeur sont approximativement les mêmes.

Une autre caractéristique particulière concerne la quantité de résidus produits lors de la fission. En première approximation, on peut admettre, sans grande erreur, que la masse de résidus radioactifs provenant de la fission est égale à celle du combustible consommé. Une centrale de 1000 MWe produit donc environ 1 tonne

Une centrale de 1000 MWE produit donc environ 1 tonne de produits radioactifs par an (Ce problème sera reexaminé ultérieurement).

En fait cette quantité est répartie dans une masse de combustible non consommée qu'il faut récupérer, de sorte qu'une centrale de 1000 MWE nécessite le retraitement d'environ 30 tonnes de combustible irradié par an, desquels on extraira environ 1 tonne de résidus radioactifs. Ces résidus radioactifs ont des durées de vie fort longues ce qui pose des problèmes qui seront examinés ultérieurement.

Pour compléter notre comparaison rappelons

qu'une centrale à charbon de 1000 MWE consommant 3 millions de tonnes de charbon par an, produit environ 10 millions de tonnes de CO^2 par an.

À part les résidus radioactifs, une centrale nucléaire ne produit aucune nuisance et aucune pollution particulière de cette nature

V.4 - LES DIFFERENTES FILIERES.

On a vu précédemment que 2 voies s'ouvraient pour le développement des réacteurs nucléaires :

- les réacteurs à neutrons thermiques,
- les réacteurs à neutrons rapides.

Les probabilités qu'ont les neutrons de provoquer la fission des noyaux lourds sont d'autant plus grandes que leur énergie est basse. Lorsqu'on laisse les neutrons diffuser par chocs successifs dans un milieu peu capturant, ils finissent par acquérir une vitesse moyenne correspondant à la vitesse d'agitation thermique du milieu. Les neutrons se mettent donc en équilibre thermique avec le matériau dans lequel ils se propagent. Lors de la fission, les neutrons naissent avec une énergie de l'ordre du MeV ; dans un milieu ayant une température de 600°K (327°C), l'énergie moyenne des neutrons est de 0,05 eV. On voit quelle perte d'énergie vont avoir à subir ces neutrons, passant d'une énergie de naissance de l'ordre du MeV à une énergie finale de $\frac{5}{100}$ eV. Les réacteurs qui fonctionnent dans de telles conditions sont appelés "réacteurs à neutrons thermiques" car la plupart des réactions nucléaires s'y produisent lorsque les neutrons sont devenus thermiques.

Plusieurs possibilités existent dans ce domaine, d'abord celles utilisant de l'uranium naturel.

V.4.1 - Les filières utilisant de l'uranium naturel.

On ne connaît que 3 matériaux : le graphite très pur,

l'eau lourde, le Beryllium, qui soient susceptibles de ralentir efficacement les neutrons sans les capturer. Ces matériaux ne contenant que des noyaux légers (C,O,Be) font perdre beaucoup d'énergie aux neutrons lors des chocs successifs sans pour autant qu'il y ait capture neutronique. La technologie du Beryllium n'ayant pas été mise au point industriellement, il ne reste finalement que le graphite et l'eau lourde. Comme on l'a rappelé, le fonctionnement d'un réacteur nucléaire est une affaire de bilan neutronique ; dans un réacteur nucléaire utilisant l'uranium et le graphite ce bilan est particulièrement tendu. La situation est meilleure pour l'eau lourde que pour le graphite mais la mise en oeuvre de l'eau lourde est difficile, de plus son prix de revient (70\$ /litre) est relativement élevé.

V.4.1.1 - Réacteurs à Uranium naturel et au graphite refroidis au gaz

On a dit précédemment que l' U_{235} et le Pu_{239} sont fissionables ; le premier est un élément naturel existant, à raison de 1 partie pour 140 dans l'Uranium naturel, le second est un radioélément artificiel produit à partir de la capture d'un neutron par l' U_{238} . Pour se procurer de l' U_{235} , il faut donc le séparer de l' U_{238} (ce qui pose des problèmes technologiques très difficiles et très coûteux) ; pour se procurer du Pu_{239} il faut faire irradier de l'Uranium naturel dans un réacteur puis en extraire, par un retraitement chimique approprié le Pu_{239} formé. La 2ème voie est moins onéreuse que la première, et elle nécessitait il y a 20 ans une technologie moins avancée que la séparation isotopique (cou-

porté par un secret jalousement gardé, aussi bien à l'Est qu'à l'ouest). La possession d'uranium 235 ou de plutonium 239 permet de fabriquer des bombes A. Au cours de la dernière guerre, les USA dans leur hâte de tous expérimenter ont adoptés l'un et l'autre des procédés évoqués ci-dessus, les 2 bombes atomiques que les américains utilisèrent contre le Japon, comprenaient l'une du plutonium, l'autre de l' U_{235} . Après la guerre, la technologie et les connaissances américaines permirent à l'Angleterre d'en faire autant, mais à une échelle beaucoup plus modeste (l'usine de séparation isotopique anglaise de Capenhurst ayant une faible capacité de production). Les russes, de leur côté, imitèrent les américains et rivalisèrent avec eux en construisant à la fois des usines de séparation isotopique importantes et de nombreux réacteurs plutoni-gènes, quant aux français, appauvris mais désireux de rester parmi les grandes puissances ils se contentèrent initialement de produire du plutonium ; c'était en effet beaucoup moins onéreux et puis, surtout il fallait opérer tout seul, (les secrets nucléaires ne se partageant guère). Pour produire du plutonium, il faut construire des réacteurs à uranium naturel, l'eau lourde est chère et son marché n'est pas accessible à tout le monde, elle nécessite des installations industrielles importantes, grandes consommatrice d'énergie, (la France n'en avait pas) le graphite au contraire produit à partir de coke de brai est relativement simple à préparer. La difficulté principale de fabrication industrielle consiste à éviter les impuretés, la teneur en impuretés en particulier le bore doit être inférieure à quelques parties par millions (ppm). Une fois ces difficultés résolues (elles ne sont pas simples à résoudre

car un réacteur nucléaire contient plusieurs milliers de tonnes de graphite) il faut fabriquer des éléments de combustible en Uranium métallique et les gainer afin que les produits de fission restent emprisonnés dans le métal et ne s'en échappent pas. Il faut, bien sûr, utiliser des matériaux qui capturent peu les neutrons, un examen rapide des différents éléments révèle que seuls, l'aluminium et le magnésium satisfont aux différentes conditions requises pour le gainage.

Les barreaux d'uranium naturel gainés d'un alliage de magnésium, sont disposés à intervalles réguliers dans des canaux percés, dans un empilement de graphite, ils s'échauffent lors du fonctionnement du réacteur, pour les refroidir, on fait circuler un courant de gaz carbonique CO_2 (qui absorbe peu les neutrons). Il n'est pas nécessaire que ce réacteur plutonigène fonctionne à très haute température, donc, les suggestions du gainage ne sont pas gênantes, l'uranium 235 contenu dans l'uranium naturel se fissionne, les neutrons produits servent :

- à entretenir la fission de chaîne,
- à produire le plutonium.

Enfin un certain nombre d'entre eux disparaissent lors de captures parasites ou s'échauffent à l'extérieur. Pour diminuer ces fuites à l'extérieur on est conduit à accroître les dimensions des réacteurs dont certaines atteignent alors plusieurs dizaines de mètres de long et autant dans les 2 autres directions.

La Grande Bretagne et la France poursuivant des objectifs identiques ont construits de tels réacteurs puis ont essayé l'une et l'autre de les utiliser en vue de la production d'énergie électrique. Une telle utilisation s'est heurtée à des difficultés sérieuses qui ont cependant pu être résolues de façon satisfaisante sur le plan technique. Ces réacteurs présentent un inconvénient certain

- ils ont des dimensions très importantes,
- ils ne peuvent pas fonctionner à des températures très élevées (inférieure à 300°C) par suite de la nature du matériau de gainage.
- ils ont un bilan neutronique très tendu de sorte qu'ils peuvent difficilement redémarrer rapidement après un arrêt intempestif; il faut en outre changer le combustible assez fréquemment.

Par contre, ils présentent l'énorme avantage de ne pas nécessiter l'emploi d'uranium enrichi.

Les centrales construites en France sur ce modèle ont nécessité des mises au point laborieuses mais elles ont fini par fonctionner très correctement, au total, à Chinon St Laurent des Eaux et Bugey une puissance de 2300 MW a été construite, une centrale de ce type a été également construite en Espagne par l'industrie française.

Suivant l'exemple de la plupart des grands pays industrialisés, la France a décidé en 1969 de construire des centrales

à uranium enrichi quand il fut certain, après la mise en route de Pierrelatte, que nous disposions des techniques d'enrichissement adéquates.

V.4.2.1 - Les réactions à uranium naturel utilisant de l'eau lourde

En ce qui concerne l'eau lourde ; il existe une difficulté technique sérieuse due à la nature liquide de ce corps. Il faut construire une cuve de grandes dimensions contenant de l'eau lourde dans laquelle plonge des barres d'uranium gainées et très chaudes, qui doivent être refroidies par un fluide adéquat ; plusieurs fluides ont été essayé, l'eau ordinaire (mais les risques de mélange sont grands, et le bilan neutronique mauvais), l'eau lourde (mais l'investissement global est élevé), des liquides organiques (mais des difficultés de polymérisation sous rayonnement apparaissent), le gaz (CO_2) mais des problèmes technologiques sérieux apparaissent pour isoler le gaz. Plusieurs pays dont la France et le Canada se sont lancés dans cette voie, la France a finalement abandonné après avoir construit une centrale expérimentale de 70 MWe en Bretagne, le Canada continue seul, d'autres pays (Suisse, Suède) ont également abandonné après quelques essais sur des prototypes.

Les réacteurs à eau lourde et uranium naturel sont séduisants car leur bilan neutronique est beaucoup moins tendu que celui des réacteurs à uranium naturel à graphite, mais leur technologie est difficile; les problèmes soulevés auraient certainement

pu être résolu si des moyens suffisants y avaient été consacrés.

V.4.2 - Les réacteurs utilisant de l'uranium enrichi

Dans le domaine nucléaire comme dans beaucoup d'autres, l'influence des USA est prépondérante, les USA ont construit pendant la guerre (ou immédiatement après) de très grandes usines de séparation isotopique, ils ne manquaient nullement d'énergie à l'époque, de sorte qu'ils ne firent pas les efforts que dépensèrent les pays européens pour essayer de construire des centrales électrique nucléaires utilisant l'uranium naturel. Les USA, où le réacteur à uranium naturel n'intéressait personne, se lancèrent après la guerre dans l'étude d'un réacteur de propulsion pour sous marin ; un réacteur nucléaire est en effet le moyen rêvé pour constituer la source d'énergie d'un sous-marin. (La production d'énergie se fait sans consommation d'oxygène sans émission de résidus toxiques ou gênants, la charge de combustible initial peut permettre d'accomplir des trajets considérables équivalent à plusieurs rotation sous marine de la Terre). Seuls les réacteurs utilisant l'uranium enrichi ont des dimensions suffisamment modestes pour être installés à bord d'un sous-marin sans y occuper trop de place. La conjoncture internationale aidant, cet objectif pris aux USA entre les mains de l'Amiral Rickover un essor considérable. L'AEC confia à Westinghouse et à la General Electric le développement et la construction des réacteurs nucléaires pour sous-marins et l'énorme budget militaire s'y engouffra. Après quelques tâtonnements, l'industrie américaine construisit bientôt en série ces réacteurs du type pressurisés, dans lesquels le coeur du réacteur

est constitué par des plaques d'uranium enrichi gainé en zircalloy plongeant dans de l'eau ordinaire contenue dans une cuve d'acier de très forte épaisseur. L'eau est maintenue sous très forte pression à l'intérieur de la cuve de façon à lui interdire l'ébullition, un circuit d'eau chaude sous pression alimente un échangeur et un générateur de vapeur qui entraîne alors une turbine. Plusieurs dizaines de réacteurs de sous-marins furent ainsi construits ; de nombreuses difficultés techniques purent certes être résolues, mais le tout se développa dans le secret et sans qu'aucun aspect financier déterminant vint contrecarrer le développement de ces réacteurs. L'industrie américaine acquit ainsi une grande maîtrise de la construction nucléaire. En Europe, en France et en Angleterre en particulier, l'atome est au contraire resté longtemps entre les mains de l'Etat, l'industrie de ces pays travaillait sous contrat ne faisant guère d'études d'ensemble et restait à l'écart de certaines connaissances. Cette situation avait 2 origines d'une part le désir des organismes gouvernementaux de conserver leur position, d'autre part le peu d'empressement de l'industrie pour entreprendre des recherches longues et coûteuses. Il se développa ainsi d'un côté de l'atlantique une industrie nucléaire puissante très au fait des problèmes et de la technologie des réacteurs utilisant l'uranium enrichi et de l'autre côté des organismes gouvernementaux français et anglais travaillant seuls. Ces 2 Etats auraient peut-être pu s'entendre pour faire naître une industrie nucléaire européenne, ils ne le voulurent sans doute pas très fortement, en outre, les liens nucléaires privilégiés existant entre les USA et l'Angleterre s'y opposèrent ; ainsi les réacteurs à uranium naturel furent abandonnés. Les réacteurs pour sous-marins ne visaient aucun objectif

économique, ils avaient un très mauvais rendement, fonctionnaient à des températures relativement basse (de l'ordre de 300°C), utilisaient mal l'uranium qu'il contenait, ils étaient coûteux, peu rentables et semblaient n'avoir aucun avenir dans la production d'énergie à usage civil, en somme, ils avaient tout pour déplaire mais ils avaient un avantage considérable, ils marchaient bien et avaient accumulé une solide expérience dans des conditions d'exploitation particulièrement difficiles (à bord des sous-marins). La Société Westinghouse tenta d'opérer des améliorations ; elle abaissa l'enrichissement du combustible, remplaça le métal par l'oxyde d'uranium etc... et sans doute aidé par les groupements financiers adéquats elle vendit en 1955 sa première centrale nucléaire de 175 MWE à une compagnie privée américaine productrice d'électricité.

La General Electric de son côté développa un modèle de réacteurs à l'uranium enrichi dans lequel l'eau atteint l'ébullition, il s'agit en somme d'une chaudière nucléaire. Sans pouvoir s'appuyer sur l'expérience militaire des réacteurs PWR (Pressure Water Reactor) les réacteurs bouillants de la General Electric BWR (Boiling Water Reactor) se sont également lancés à la conquête des marchés civils. Les 2 sociétés Westinghouse, et General Electric après avoir conquis le marché américain se sont récemment emparés du marché européen. Celui-ci, morcelé entre des états ayant bien souvent des budgets voisins ou inférieur au chiffre d'affaire de ces géants américains, contrôlés par des gouvernements n'ayant pas toujours une politique énergétique clairement défini,

caractérisés par une absence de sociétés industrielles fortement structurées, n'a pas pu résister longtemps ; il a fini par adopter les formules américaines utilisant l'uranium enrichi au détriment des formules plus adaptées aux besoins des pays Européens, qui ne possèdent pas encore d'usine de séparation isotopique capable de produire de l'uranium enrichi à un prix compétitif. L'histoire de l'énergie atomique est riche d'enseignement, elle montre que l'Europe non unifiée ne peut rien faire dans les domaines des techniques de pointe sans l'accord ou l'appui américain. Les raisons en sont multiples, énormité du marché intérieur américain, efficacité des firmes américaines, division européenne; la situation actuelle est pour le moins paradoxale : les européens ont adopté la formule des réacteurs américains fabriqués en Europe sous licence des firmes américaines mais ils ne disposent pas encore des sources de combustible nucléaires spécifiques adaptées à leur besoin et à leur potentiel, la France et l'Angleterre ont dépensés des sommes d'argent énormes pour développer une technologie nucléaire spécifique adaptée, l'Allemagne par suite de la guerre a été longtemps tenu à l'écart de l'énergie nucléaire, lorsque sa puissante industrie s'y est lancée elle a passé des accords avec les sociétés américaines et a rapidement rattrapé les pays européens en comblant le retard.

C'est ainsi que ce que l'on a appelé la guerre des filières s'est terminée par la victoire complète de la filière américaine qui a conquis non seulement le marché européen mais également le marché mondial puisqu'avant la crise pétrolière, cette filière totalisait environ 20000 MWE en construction ou en commande (5 fois la puissance électrique totale installée en France à cette époque) et les récents événements pétroliers n'ont fait qu'ac-

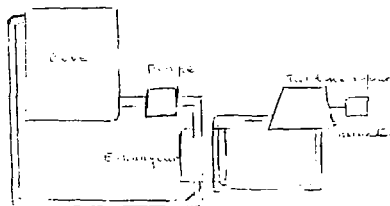
célérer le mouvement. Il ne faut pas croire que le passage des modèles de réacteurs à usage militaire à ceux à usage civil s'est fait sans difficultés ; il est bien connu que les sociétés américaines General Electric et Westinghouse ont perdu des centaines de millions de \$ lors de la vente de leur première centrale nucléaire à usage civil. Car la bataille fut chaude entre les pétroliers et les tenants du nucléaire, en 1955 lors de la conférence de Genève le nucléaire paraissait avoir gagné la bataille, ce n'était qu'illusion, car le gaz naturel apparut en quantités massives et à bas prix sur le marché énergétique et remit tout en questions ; c'est à partir de ce moment que les filières européennes ont abandonné la bataille au profit de la filière américaine. Tout paraît maintenant s'être "arrangé". les pétroliers se reconvertissent progressivement au nucléaire (sans abandonner trop rapidement leur position) et cette fois les réacteurs nucléaires paraissent irrémédiablement "partis", chacun s'est partagé le marché mondial et ceci pour de longues années. N'oublions pas qu'il faut 20 à 25 ans pour qu'une filière nucléaire s'impose et devienne opérationnelle en offrant les garanties de fiabilité, de sûreté et d'efficacité nécessaires.

V.4.3 - Les autres filières

De nombreuses autres possibilités ont été explorées (et le sont encore) aux USA et ailleurs. Elles utilisent toutes de l'uranium enrichi ou du Plutonium. Passons les rapidement en revue en essayant d'en déduire quelques conclusions prospectives.

v.1.3.1 - Réacteurs homogènes .

L'idée est séduisante mais la réalisation industrielle est très délicate. Le principe est le suivant : le matériau fissile (U_5 , Pu_3) est mis en solution, celle-ci circule dans une installation où on lui permet de se rassembler dans une cuve en quantité suffisante pour atteindre les conditions requises de masse critique. Dans tout le reste de l'installation les conditions de criticité

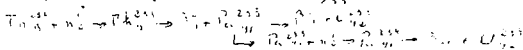


ne sont pas atteintes . Les réactions de fission se développent au sein du liquide fissile contenu dans cette cuve, celui-ci s'échauffe, circule et passe dans un échangeur où il cède ses calories à un circuit de vapeur entraînant une turbo alternateur.

De nombreux essais ont été entrepris aux USA (Oak Ridge);

ils se sont heurtés principalement à des problèmes de corrosion, les sels de matériaux fissiles sont très corrosifs et les produits de fission accélèrent encore cette corrosion. Ce réacteur offre des avantages sérieux car on peut retraiter sur place le combustible, en extraire les produits de fission qui l'empoisonne, y réinjecter du combustible au fur et à mesure qu'il s'épuise . etc... Une autre variante consiste à utiliser non pas une solution aqueuse acide mais un sel fondu, ce qui permet d'accroître notablement la température de fonctionnement, le MSR, (Molten Salt Breeder

Reacteur) offre la possibilité de réaliser du breeding thermique à partir du cycle Thorium - U₂₃₃ suivant la réaction



Le problème consiste à extraire le Pa₉₁²³³ au fur et à mesure de sa formation afin qu'il donne par décroissance de l'U₉₁²³³ stable et fissile (qui pourra être utilisé dans d'autres réacteurs) et non pas de l'U₉₂²³⁴ non fissile par capture neutronique.

Avec le cycle du thorium c'est donc tout une autre filière qui pourrait naître et concurrencer l'uranium. Les gisements mondiaux de Thorium sont abondants et encore peu exploités. Pour que cette filière débouche il faudrait qu'un groupe industriel industriel d'envergure internationale la prenne en charge en y incluant des spécialistes et des techniciens de la métallurgie, de la chimie, de la neutronique etc... Aux USA cette filière est déjà entre les mains d'un groupe industriel important comprenant 15 compagnies d'électricité avec un bureau d'étude Ebasco, et les Sociétés industrielles, Babcock et Wilcox, Byron Jackson, Stellite Division of Cabot Corporation, Union Carbide et Continental Oil. C'est dire que tout est prêt il suffit d'attendre le moment opportun (rien d'équivalent n'existe en Europe à part une timide collaboration de Pechiney Ugine Kulhmann) avec les groupes américains précédemment cités).

V.4.3.2 - Les réacteurs à haute température

La faiblesse congénitale des réacteurs nucléaires

en service actuellement est leur faible rendement, de l'ordre de 30 %

(inférieur à celui des centrales à combustible fossile) la raison principale provient du fait qu'ils fonctionnent à une température trop basse 300°C environ. Il faut signaler à ce sujet combien les études technologiques s'enchevêtrent et s'interpénètrent, les constructeurs de turbine à vapeur sont contraints aujourd'hui de revenir en arrière ; alors que depuis 50 ans des efforts longs et coûteux avaient permis de réaliser des turbines à hautes performances (550°C, 70 à 80 kg de pression) les chaudières nucléaires actuelles ne produisent que de la vapeur à basses température et pression (300°C 30 kg).

En outre, ces basses températures sont, comme on le verra, graves en ce qui concerne la pollution thermique. De sorte que la recherche des conditions d'obtention des hautes températures de fonctionnement se poursuit.

Les réacteurs à haute température actuellement envisagés se caractérisent par l'utilisation en graphite comme modérateur et de l'hélium sous forte pression (50 kg) comme fluide de réfrigération. Le combustible est sous forme de particules enrobés, c'est-à-dire de billes sphériques d'environ 1 mm de diamètre (contenant la matière fissile) dont le revêtement est imperméable aux produits de fission, enchassés dans des matrices de graphite. L'ensemble du circuit primaire d'hélium est intégré dans un caisson en béton précontraint, la température du gaz à la sortie du réacteur est de 7 à 800°C (pour atteindre 900°C 1000°C dans une 2ème étape).

- Il existe différentes variantes. On peut songer à utiliser
- un cycle mixte au thorium et à l'Uranium 235,
 - un cycle mixte à l'uranium 235 et à l'uranium 238.

Dans le domaine de la chaleur industrielle les réacteurs à hautes température ouvrent de très nombreuses perspectives telles que

- la production d'un mélange réducteur H_2-CO par steam craking d'un combustible fossile pour la réduction partielle du minerai de fer en haut fourneau ou sa réduction totale sans haut fourneau. Dans ce dernier cas on éliminera à la fois la cokerie et le haut fourneau,
- la gazéification du charbon,
- la production d'éthylène,
- la production d'hydrogène par cycle chimique de décomposition de l'eau.

Dès maintenant les réacteurs à haute température sont placés entre les mains d'une société américaine (d'origine pétrolière) la Gulf Général Atomic, cette société a passé des accords avec tous les pays européens s'intéressant à ces réacteurs. En France, le CEA, la Compagnie Electro-Mécanique, les sociétés Creusot-Loire, Pechiney Ugine, Kuhlman, Cerca sont liées à la Gulf. General Atomic, des liens identiques existent avec les autres pays européens.

Tous les partenaires semblent avoir compris que cette étape nouvelle ne peut se développer dans un cadre national trop

étroit et dès maintenant, l'ère d'une très vaste Société multinationale est préparée.

V.4.3.3 - Les réacteurs à neutrons rapides

Les réacteurs à neutrons thermiques ne permettent que de brûler l'uranium 235 (élément particulièrement rare) ou du Plutonium 239 (radioélément artificiel coûteux et difficile à produire) ; seuls les réacteurs à neutrons rapides permettent de consommer l'uranium 238 et donc d'extraire de l'uranium la quasi totalité de l'énergie potentielle qu'il recèle. Le processus de breeding permet une production d'énergie nucléaire sans limite pratique. En outre,

- les coûts d'investissement apparaissent comme étant du même ordre de grandeur que ceux des autres types de centrale,
- le coût du combustible grâce à l'excellente utilisation du plutonium produit paraît nettement inférieur à celui des autres filières.

Les réacteurs à neutrons thermiques actuelles PWR/BWR utilisent comme fluides de réfrigération de l'eau ce qui permet d'utiliser la technologie industrielle classique des turbo alternateurs (même si les caractéristiques de vapeur sont moindres). Les réacteurs à neutrons rapides ne peuvent pas utiliser un liquide hydrogéné. 2 solutions sont alors possibles :

- Le sodium liquide, c'est le cas le plus fréquemment envisagé et celui qui dès maintenant a donné lieu à des réalisations semi industrielles importantes. Le sodium a une masse atomique relative

vement élevée de sorte que son pouvoir de ralentissement neutronique n'est pas trop grand. Par contre, la mise en oeuvre de plusieurs centaines de tonnes de sodium liquide très chaud, qu'il faut pomper en évitant soigneusement les fuites et tout contact avec l'eau pose des problèmes technologiques délicats.

L'hélium dont les remarquables propriétés de fluide caloporteur permettent de s'accommoder d'une légère dégradation du spectre neutronique. Le réacteur rapide refroidi à l'hélium est encore au stade du prototype mais il semble prometteur.

Dans ce domaine, l'Europe a pris sur les USA une certaine avance ; il est hors de doute que le réacteur nucléaire de l'avenir est le réacteur à neutrons rapides produisant à la fois de la chaleur et remplaçant (en totalité ou en partie) le combustible qui se consomme en produisant du plutonium. A titre d'exemple signalons que en France d'après les prévisions actuelles, la mise en route d'une centrale à neutrons rapides de 1000 MWe doit pouvoir se faire en 1979 en faisant appel uniquement aux ressources nationales de plutonium. Pour situer les ordres de grandeurs signalons que la première charge de cette centrale représentait 2,6 tonnes de Plutonium et que 1 tonne de Plutonium peut être produite en un an par ce réacteur (en 3 ans ce réacteur produira autant de plutonium qu'il en aura consommé pour son démarrage). La France occupe dans ce domaine une place de choix, sans doute dominante en Europe, l'Angleterre est également bien placée. C'est pour combler son retard que l'AEC fait porter un effort maximum de son plan quinquennal 75-80 (analysé au Chapitre IV). Les USA ont connu de nombreux déboires dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium car les problèmes

technologique sont difficiles. Aussi bien aux USA qu'en Allemagne par exemple, l'industrie n'est pas pressée de se lancer dans cette voie ; elle vient d'aborder une première approche du nucléaire, elle y a investi des capitaux importants, les groupes financiers veulent maintenant rentabiliser leurs installations. Tout le monde s'accorde à reconnaître en général que les réacteurs à neutrons rapides seront les réacteurs de l'avenir mais les avis divergent sur leur date d'entrée dans le monde industrielle pour les organismes qui, comme le CEA, reçoivent leur budget de l'état, cette date devrait être la plus proche possible, pour ceux qui cherchent à amortir leur investissements et à les rentabiliser le mieux possible cette date ne doit pas être trop proche. Dans ce domaine comme dans beaucoup d'autre, l'équilibre est bien difficile à trouver.

Les réacteurs à neutrons rapides ont déjà fait, en Europe principalement (et en France tout particulièrement), la démonstration de leur validité mais leur technologie très avancée doit s'appuyer sur une industrie puissante et fortement structurée. L'Europe tirant la leçon des expériences passées pourrait essayer de constituer un groupement industriel qui prenne en charge la construction de ces réacteurs mais le moment ne semble pas encore venu pour aborder cette étape. D'une part, les réacteurs à neutrons rapides utilisent massivement le plutonium et le stock de ce matériau est encore insuffisant pour assurer un approvisionnement suffisant en outre les industriels américains qui viennent de se lancer en grand dans les réacteurs à eau légère ne souhaitent pas aller trop vite. L'Europe doit continuer à se préparer pour

doivent se placer quand le moment viendra car les réacteurs à neutrons rapides demeurent indiscutablement le meilleur moyen d'utiliser le Pu produit dans les réacteurs à neutrons thermiques et le seul capable d'extraire de l'uranium naturel la quasi totalité de l'énergie qu'il recèle ; leur introduction sur le marché électronucléaire se présente non pas en terme de substitution pure et simple des filières thermique mais plutôt en terme de coexistence avec celles-ci.

Le tableau suivant met en évidence l'intérêt des réacteurs à neutrons rapides.

TABLEAU XIX

Type de réacteur	Energie fournie en KWh/tonne d'uranium naturel.	Puissance installée MWe/tonne d'uranium naturel	Comparaison avec PWR.	Commentaires
Filière française à U naturel graphite gaz.	0,310 ^A	1,1	0,5	
PWR	0,710 ^P	2	1	On suppose que le taux de rejet de l'uranium est de 0,28 %
RWR	0,810 ^B			
Réacteurs à haute température				
a) cycle uranium	0,7510 ^B	2,5	1,1	
b) cycle U enrichi anoricum	. 10 ^B	3,8	1,4	
Réacteurs à neutrons rapides	5,910 ⁹	16,7	84	

Ce tableau montre que les réacteurs à neutrons rapides fournissent 84 fois d'énergie que les réacteurs PWR pour la même quantité d'Uranium investit au départ. On notera les faibles performances des réacteurs à uranium naturel (sans oublier qu'ils ne nécessitent pas la construction d'usine de séparation isotopique).

Si le Pu produit dans les réacteurs à neutrons thermiques est recyclé par les réacteurs à neutrons rapides le bilan s'établit ainsi :

PWR	$0,48 \cdot 10^8$ kWh + 1330 g de Pu par tonne d'Uranium naturel		
RWP	$0,52 \cdot 10^8$ kWh + 1510 g	"	"
HTR	$0,58 \cdot 10^8$ kWh + 760 g	"	"

Le Pu produit dans les réacteurs à neutrons thermiques étant susceptible de produire de l'énergie dans les réacteurs à neutrons rapides au taux de $0,24 \cdot 10^8$ kWh/kg Pu. On met ainsi en évidence le rôle important du cycle et du recyclage de la matière fissile dans les réacteurs. Les réacteurs à neutrons rapides n'apparaîtront au stade industriel que lorsque la quantité de Pu produite par les réacteurs à neutrons thermiques, le permettra. Au stade actuel leur apparition est prématurée, d'une part leur technologie doit encore s'affermir, d'autre part ils ne peuvent pas s'autoalimenter. Ils ne le pourraient que si la croissance des besoins énergétiques se ralentissait ; il paraît possible qu'un "régime de croisière" énergétique puisse s'imaginer autour d'un temps de doublement tous les 15 ans.

Une autre possibilité peut également être envisagée avec le thorium : on pourrait réduire la contribution d' ^{235}U d'un facteur 4, le reste étant fourni par le thorium mais il s'agit là d'hypothèse qui reste à vérifier.

A long terme, en 2000 et au-delà, il y a de grandes chances pour que les réacteurs à neutrons rapides constituent une partie importante du parc des centrales nucléaires en France.

V.5 - LES PROBLEMES DE SURETE ASSOCIES A L'ENERGIE NUCLEAIRE

Les noyaux qui subissent la fission nucléaire se cassent 2 (ou 3) fragments constitués par des noyaux plus légers que les noyaux lourds qui ont subi la fission, ils sont radioactifs et leur période est très variable, elle s'étend de quelques fractions de seconde à plusieurs milliers d'années. La production de ces résidus radioactifs est une suggestion très lourde pour les réacteurs nucléaires ; car il faut éviter que ces produits radioactifs ne s'échappent.

Les problèmes concernant la sûreté de l'énergie nucléaire se rencontrent dans les réacteurs, dans les usines de retraitement du combustible irradié et dans les stockages des résidus radioactifs.

V.5.1 - Les problèmes de sûreté dans les réacteurs nucléaires

V.5.1. Les risques d'explosion nucléaire

Les réacteurs nucléaires contiennent une quantité importante de matière fissile. Peut-on imaginer de ce fait un régime de fonctionnement d'un réacteur ayant un caractère explosif ? La réponse à une telle question est négative, elle repose sur des conditions physiques que l'on peut brièvement résumer de la façon suivante.

Dans les réacteurs nucléaires on cherche à "bruler" aussi régulièrement que possible une masse très importante de matière fissile ; la notion de taille critique évoquée précédemment impose que les réactions de fission ne peuvent être autoentretenuës que si cette masse est atteinte ; la nécessité de disposer d'une grande quantité de combustible permettant une longévité de fonctionnement suffisante accroît encore cette masse de matière fissile. La vitesse de libération de l'énergie de fission dépend du temps de vie des neutrons dans le milieu fissile ; plus ce temps de vie est court, plus le taux de libération de l'énergie peut être élevé. On a $\frac{dn}{dt} = \frac{n}{\tau}$ n = densité de neutrons ; t = temps d'ou $n = n_0 e^{t/\tau}$.
 τ = temps de vie des neutrons.

Ce temps de vie étant de l'ordre de 10^{-3} seconde pour les réacteurs à neutrons thermiques et de 10^{-5} seconde pour les réacteurs à neutron rapides on risquerait d'attendre des taux de libération

d'énergie très importante si d'autres phénomènes n'intervenaient pour limiter cette croissance ; certains sont liés à la physique des phénomènes (certains neutrons ne sont pas émis instantanément à la fusion mais plusieurs secondes après; les probabilités de fission des matériaux fissiles utilisées peuvent sous certaines conditions décroître quand la température s'accroît) d'autres dépendent de l'architecture du réacteur qui permet de réaliser un autofrènage des réactions par suite de la dilatation des matériaux et des modifications de conditions de disparition des neutrons par fuite ou par capture.

La vitesse de libération de l'énergie dans les réacteurs à fission est donc obligatoirement limitée, elle ne peut en aucun cas aboutir à une explosion du type nucléaire ; la vitesse de dislocation du système, qui dépend de la vitesse du son dans le milieu étant dans tous les cas supérieure à celle nécessaire pour atteindre un régime explosif dans la matière non comprimée.

On retiendra que les risques d'explosion du type nucléaire sont inexistant (quel que soit le modèle de réacteurs utilisés, ce qui n'exclut pas évidemment que les risques d'incendie, d'explosion classiques soient nuls mais ils sont d'un ordre de grandeur voisin de ceux que l'on peut rencontrer dans les centrales classiques (incendie de fuel etc...) toutefois, leur conséquences en sont plus graves par suite de la présence au sein du réacteur des produits de fission.

V.5.1.2 - Les risques de libération des produits de fission.

Ceux-ci sont confinés par 3 ou 4 barrières :

a) la barrière du combustible

Le combustible qu'il soit sous forme de plaque de cylindre ou de sphère est gainé de matériaux destinés à interdire la sortie des produits de fission. Ceux-ci sont donc confinés à l'intérieur de cette gaine ; au cas où ils réussiraient à s'échapper (rupture de gaine, fission de la gaine etc...) ils se répandraient dans la cuve du réacteur.

b) La barrière constituée par la cuve du réacteur : quelque soit le modèle de réacteur le milieu fissile est disposé à l'intérieur d'une enceinte étanche (qui parfois est double), celle-ci peut être, en acier (cuve d'acier d'épaisseur 30 à 40 cm pour les réacteurs à eau), en béton précontraint (pour les réacteurs à uranium naturel refroidi au gaz), de sorte que si les produits de fission franchissent la 1ère barrière, et sont confinés par la 2ème et leur présence est détectée bien avant que leur accumulation présente des risques quelconques, enfin pour palier à un risque d'incendie ou d'explosion, ou une perte entraînant la rupture des 2 ou 3 barrières précédentes le bâtiment abritant le réacteur est lui-même étanche et son volume est tel qu'il peut "contenir" l'énergie libérée au cours de l'accident paraissant le plus dangereux.

c) Le bâtiment du réacteur : constitue une dernière barrière à l'intérieur de laquelle les produits de fission qui pourraient s'échapper du réacteur sont confinés.

On peut, bien sur, imaginer des catastrophes extraordinaires du genre chute d'un avion gros porteur sur la centrale; pour y remédier

il a été décidé que la dalle de protection des réacteurs doit résister à une telle éventualité. On peut encore songer aux tremblements de terre. La construction des réacteurs doit satisfaire à certaines normes et certains d'entre eux sont protégés par ^{des} détecteurs de vibration qui les arrêtent instantanément si plusieurs détecteurs sismiques fonctionnent simultanément.

Enfin, il y a le risque de sabotage volontaire ; en général les circuits principaux de sûreté sont doubles et les règles d'exploitation imposent certaines consignes destinées à éviter de tels risques, mais il faut admettre qu'à ce point de vue il est difficile de se prémunir totalement (ceci est vrai pour la plupart des installations nucléaires ou non nucléaires).

V.5.2 - Les problèmes de sûreté dans les usines de retraitement et les transports

Le combustible utilisé dans un réacteur nucléaire ne peut-être consommé totalement ; il faut donc périodiquement extraire (en général 1 fois par an pour les réacteurs de la filière à eau et uranium enrichi) la partie la plus usée et y introduire du combustible frais (non radioactif). Ces combustibles irradiés sont très fortement radioactifs, ils devront être stockés pendant un certain temps puis transportés dans les usines spéciales (en France, Marcoule, la Hague) où ils sont mis en solution ;

on récupère le combustible non consommé et celui qui a pu se produire (plutonium, ^{239}Pu par exemple) et enfin, on extrait les produits de fission. Toutes ces opérations doivent être faites dans des installations correctement protégées contre les rayonnements émis par ces produits très radioactifs ; il s'agit de génie chimique

radioactif : une technologie qui est maintenant bien au point. Les risques principaux dans ces usines concernent, les fuites de solutions radioactives au cours des différentes opérations, Les risques consécutifs au rassemblement de matière fissile en quantité supérieure à la masse critique

Plusieurs encintes (3 en général) limitent les risques consécutifs aux fuites de pollution radioactives. Quant aux risques de criticité : plusieurs moyens sont mis en oeuvre pour y faire face, on citera :

- les limitations des quantités de matière fissiles mises en oeuvre aux différents stades de l'élaboration,
- l'emploi d'absorbants neutroniques,
- les consignes d'exploitations.

Le transport des matériaux radioactifs est soumis à de sérieuses réglementations relatives aux conditions techniques, aux itinéraires, aux masses maximales autorisées etc... Les containers de transport ont fait l'objet de réglementations sévères (tenue à l'incendie, au choc etc...)

V.5.3 - Le stockage des résidus radioactifs

Le développement de l'énergie de fission à l'échelle industrielle va s'accompagner d'une production importante de résidus radioactifs résultant des combustibles irradiés, ces résidus sont constitués de fragments de fission, d'actinides, d'éléments de structures irradiés dans les réacteurs (gaines, support d'éléments combustibles cuves etc...)

Le Tableau XIX met en évidence : 1) la quantité de résidus radioactifs exprimés en curies produit chaque année par une usine traitant le combustible d'un réacteur nucléaire ayant une puissance électrique de 1 gigawatt (il s'agit d'un réacteur à eau utilisant de l'uranium enrichi à 33 % type PWR ou BWR).

2) la disparition de ces résidus par décroissance radioactive 90 jours après leur extraction du réacteur puis 1 an, 10 ans, 100 ans et 1000 ans plus tard.

La décroissance de ces résidus permet approximativement de considérer les 3 périodes suivantes :

a) cours de la première, d'une durée de l'ordre de quelques années, les résidus à vie courte disparaissent rapidement,

b) une seconde période apparaît alors ; elle s'étend sur plusieurs centaines d'années au cours desquelles le Cs¹³⁷ et Sr⁹⁰ comptent parmi les éléments dominants,

c) apparaît enfin la dernière période qui est dominée par la radioactivité des actinides et qui se poursuit pendant plusieurs milliers d'années.

Le tableau XIXbis met en évidence l'ampleur du problème des résidus radioactifs aux USA en l'an 2000 en supposant une puissance nucléaire installée ainsi qu'il est précisé sur le tableau.

Le tableau ^{XX} rappelle quelques ordres de grandeur concernant la nocivité de certains radioéléments.

TABLEAU 2

	Radio- élément	Demi- vie	Activité en curies après une décroissance de				
			90 jours	1 an	10 ans	100 ans	1000 ans
Quelques éléments de fission par un les principaux	H	12,3 ans	6,2.10 ⁶	6,9.10 ⁵	1,6.10 ⁵	1,2.10 ⁴	0
	Kr	10,3 ans	1,0.10 ⁶	9,0.10 ⁵	5,1.10 ⁴	1,6.10 ⁴	0
	Sr	28 ans	8,9.10 ⁵	6.7.10 ⁴	5,1.10 ⁴	5,9.10 ³	0
	Cs	30 ans	9,0.10 ⁵	9,0.10 ⁴	7,5.10 ³	9,0.10 ³	0
	Total des fragments de fission		5,5.10 ⁶	1.7.10 ⁶	2,7.10 ⁵	1,0.10 ⁵	2.0.10 ⁴
Quelques actinides parmi les principaux	Pu	89 ans	1,3.10 ⁶	7,0.10 ⁵ 1,1.10 ⁶	9,0.10 ⁴ 1,6.10 ⁵	1,5.10 ⁴ 9,0.10 ³	11 15
	Am	150 ans	1,5.10 ⁶	1,5.10 ⁶ 7,0.10 ⁵	1,5.10 ⁵ 7,0.10 ⁴	1,1.10 ⁴ 9,0.10 ³	1.0.10 ⁴ 1,6.10 ⁴
	Cm	164 ans	1,7.10 ⁶	5,5.10 ⁵ 7,0.10 ⁵	2,7.10 ⁵ 3,0.10 ⁴	1,2.10 ⁴ 2,0.10 ³	17 13
	Cm ²⁴⁸	17,6 ans	2,2.10 ⁶	2,1.10 ⁶ 5,1.10 ⁵	1,5.10 ⁵ 3,8.10 ⁴	5,0.10 ⁴ 1,2.10 ⁴	0 0,1
	Total des actinides		2.10 ⁶	8,2.10 ⁵ 1,0.10 ⁶	2,1.10 ⁵ 2,2.10 ⁴	2,7.10 ⁴ 9,0.10 ³	7,2.10 ⁴ 2,2.10 ⁴
Quelques autres	U ²³⁵						
	U ²³⁸						
	Np		1.10 ⁶	9.10 ⁵	1.10 ⁵	1.10 ⁴	0
	Zr etc.		5.10 ⁶			0	0

Le tableau donne les ordres de grandeur des résidus radioactifs (fragments de fission, actinides, matériaux de structure) produits chaque année par une usine retraitant le combustible irradié dans un réacteur à eau de 1 000 Mégawatts électriques utilisant de l'uranium enrichi à 3,3% ayant un taux de combustion de 11 300 mégawatt/jour/tonne et contenant 88 tonnes de combustible, en admettant que 0,5% de l'uranium et du plutonium présents après irradiation passent dans les résidus.

Les chiffres entre parenthèses sont relatifs aux résidus produits chaque année par la même usine retraitant le combustible irradié dans un réacteur à neutrons rapides de 1 000 Mégawatts électriques, à l'exception de l'oxyde d'uranium et de l'oxyde de plutonium, et ayant un taux de combustion de 30 000 MWj/t.

Les chiffres inclus dans ce tableau ont été obtenus à partir des informations contenues dans le document américain ORNL 4151 d'avril 1970 s'il ne s'agit que d'ordres de grandeur.

TABLEAU X.6.5. - 1.24

Radioéléments	Activité accumulée en l'an 2000 en millions de curies	Activité en millions de curies après une décroissance égale à				
		10 ans	20 ans	30 ans	40 ans	
Quelques fragments de fission parmi les principaux	Se ⁹⁰	15 200	0	0	0	0
	Zr ⁹⁵	0,29	0,19	0,19	0,17	0,25
	I ¹³¹	2,92	2,9	2,8	2,1	0,11
	Cs ¹³⁷	0,079	0,075	0,079	0,063	0,062
	Ce ¹⁴⁰	19 000	0	0	0	0
	Total des fragments de fission	149 000	1,1	1,1	1,2	0,7
Quelques actinides parmi les principaux	Pu ²³⁹	210	0,2	0	0	0
	Am ²⁴¹	65	17	0,11	0	0
	Cm ²⁴⁴	390	0	0	0	0
	Cf ²⁵²	0,12	0,29	0,11	0	0
	Total des actinides	1 650	15	10	1,3	0,7
Total général des résidus radioactifs	150 000	16	11	1,5	0,7	

Ce tableau exprime en millions de curies :

a) la quantité de résidus radioactifs (fragments de fission et actinides) accumulés aux U.S.A. en l'an 2000.

b) ce que deviennent ces résidus après 10^e, 20^e, 30^e, 40^e années de croissance.

Il suppose une puissance nucléaire installée de :

5 000 MW en 1970	500 000 " en 1990
133 000 " en 1990	1 200 000 " en 2000

Les chiffres contenus dans ce tableau ont été déduits de l'article intitulé : " Managing radioactive wastes " by John O. Blomker, Jero P. Nichols and William C.M.C. Chin, publié dans la revue " Physics Today ", août 1973, page 36.

TABLEAU X.6

Ordre de grandeur de la toxicité
de certains radioéléments

Elément	H ³	I ¹³¹	Sr ⁹⁰	Pu ²³⁹	Am ²⁴¹
Concentration maximale admissible dans l'eau en 10 ⁻³ ci/m ³	3 000	20	0,1	5	4

Références : Article ci-dessus de M. Sousselier.

On sait dès aujourd'hui stocker ces résidus avec grande efficacité et dans de bonnes conditions de sûreté, il est également possible que certains éléments considérés aujourd'hui comme des résidus sans valeur en acquièrent une demain. Enfin les études en cours montrent que si l'héritage radioactif que nous léguerons aux générations à venir leur procure des désagréments jugés excessifs ceux-ci, pourront certainement être amoindris, C'est ainsi qu'il a été envisagé, en ce qui concerne les résidus les plus nocifs.

- de les concentrer, puis de les expédier par fusées vers d'autres planètes,

- ou bien encore de procéder à leur enfouissement dans les couches très profondes de la terre,

- ou bien encore de les transmettre en irradiant certains d'entre eux parmi les plus nocifs (Cs^{137} et Sr^{90} par exemple) pour les transformer en éléments stables donc non radioactifs. Les conditions d'irradiation dans les réacteurs à neutrons thermiques ne sont pas satisfaisantes, celles rencontrées dans les réacteurs à neutrons rapides à peine plus, celles qu'offrirait les réacteurs à fusion que nous évoquerons ultérieurement paraissent au contraire attrayantes.

En attendant cette époque, il faudra stocker ces produits de fission de manière sûre et à un prix raisonnable. Actuellement les produits peu actifs sont stockés soit sur une aire aménagée platifiée et recouverte de terre, soit en tranchées bétonnées à La Hague. Les produits plus actifs sont stockés sous forme liquide

dans des cuves en acier inox avec double enveloppe, enceintes bétonnées, cuve de réserve, ils sont sous surveillance continue. Un procédé séduisant consiste à vitrifier ces résidus et à les conserver à l'état solide, l'atelier pilote de Marcoule ayant permis d'atteindre des résultats satisfaisant ce procédé deviendra industriel dans un proche avenir (cette idée est retenue dans tous les pays).

Le coût actuel du stockage représente 2 à 3 % du prix du cycle de combustible soit 0,7 à 0,8 % du prix du kWh.

D'autres stockages sont également envisagés (mines de sel désaffectées, fortifications abandonnées).

Le stockage à long terme des produits de fission pose des problèmes difficiles de surveillance et de maintenance mais d'une part, le volume de ces résidus radioactifs est relativement modeste (ainsi qu'en témoigne le tableau ci-joint), d'autre part les techniques de stockage sont maintenant bien éprouvées.

TABLEAU XX: (Référence 9)

Année	Faible activité sans α (m^3)	Faible activité avec α (m^3)	gaines (m^3)	Produits de fission concentrés mais non solidifiés (m^3)
1975	4700	400	700	200
1980	8800	700	170	380
1985	13800	1100	830	550
1990	20500	2000	980	800
1995	28600	4280	1400	1400
2000	38600	8000	1900	2100

Il est clair que là encore les risques de sabotage peuvent difficilement être exclus totalement. La comparaison des tableaux ^{2.1} et ^{2.2} met en évidence que les risques considérés sont loin d'être négligeables. La vitrification de déchets radioactifs permettront à moyen terme de se prémunir correctement contre les risques les plus vraisemblables, incendie, inondations, tremblement de terre; à plus long terme (à partir de 2000 et au-delà) les solutions évoquées précédemment (fusée, enfouissement tectonique, et surtout irradiation dans les réacteurs à fusion) permettent de trouver ces solutions satisfaisantes.

V.5.4 - Conclusion

Les risques consécutifs au développement de l'énergie nucléaires sont sérieux mais il apparaît que les techniques en usage actuellement ainsi que celles qui, dès maintenant sont envisagées pour le long terme permettent d'envisager un développement important du nucléaire sans mettre en péril la santé (ou encore moins l'évolution biologique) des bénéficiaires actuels ou futurs de l'énergie nucléaire.

Les centrales classiques à (fuel ou à charbon) émettent des tonnes de résidus gazeux (SO₂, CO₂ etc...) ou solides (cendres, poussières etc...) les centrales nucléaires ne souffrent d'aucun de ces inconvénients, elles n'émettent absolument rien de nocif lors

du fonctionnement normal ; en cas d'incident, les précautions retenues évitent des accidents radioactifs graves ; par contre le stockage des résidus radioactifs pose des problèmes à moyen et long terme qui doivent faire l'objet d'une surveillance constante ; ces résidus sont heureusement peu abondants et sont relativement faciles à stocker efficacement. Il est cependant un problème qui demeure, c'est celui de la pollution thermique ; tout au moins avec la génération actuelle des centrales nucléaires ; celles-ci ont en effet un mauvais rendement. On prévoit en France vers la fin du siècle la construction d'un parc nucléaire d'au moins 150000 MW ; la nécessité de disposer de source de réfrigération importante conduit à envisager la construction de ces centrales en bordure de mer. 135000 MW pourraient être installées ainsi dont

Mer du Nord	20 000 MW
Atlantique	40 000 MW
Manche	50 000 MW
Méditerranée	25 000 MW

Le nombre de centrales à disposer sur un site nucléaire est pas facile à déterminer ; il faut tenir compte des impératifs suivants :

- le grand site impose des contraintes sévères pour le transport de l'énergie électrique produite, pour les rejets thermiques, un site de 50000 MW refroidis par réfrigérant atmosphérique humide évapore une trentaine de m^3/s (le débit de l'oise) ; le même site situé en bordure de mer échauffe de $10^\circ C$ un débit de $1800 m^3/s$ et peut provoquer des microclimats locaux.

- la disjonction générale d'un site peut déséquilibrer complètement un réseau électrique,
 - la tendance au gigantisme des groupes turboalternateurs (1200MWE actuellement) que les fabricants de centrales tendent à maintenir un niveau donné pendant un certain temps pour réduire les coûts,
 - il paraît moins onéreux d'entretenir plusieurs grosses centrales groupées que de petites unités dispersées,
- par contre en cas d'incident les risques sont peut-être plus importants pour un très grand parc que pour un petit.

De nombreux pays européens ne disposant pas de côtes seront contraints d'utiliser des réfrigérants atmosphériques, ce qui majorera le coût du KWh et posera des problèmes, particulièrement par suite des grandes dimensions de ces réfrigérants.

Signalons pour terminer, qu'aux USA la possibilité de construire des centrales (à fuel ou nucléaire) sur des docks flottants au large des côtes est envisagée (une commande a été lancée concernant une centrale nucléaire constituée par 2 unités de 1150 MWE ; elle doit être mise en service en 1980,81 ; elle sera située à 3 miles d'Atlantic city (New Jersey). Le dock flottant déplace 136000 tonnes, et a une surface de 120x120m. Cette solution permet de s'affranchir de certaines servitudes (voisinage des populations, esthétique des paysages, refroidissement, approvisionnement en combustible); elle soulève des problèmes sérieux concernant les risques de collisions maritimes, la tenue à la mer, le transport de l'énergie électrique produite etc... Il semble que le coût de ces centrales ne soit pas

beaucoup plus élevé que celui des centrales terrestres (pour autant que la construction des docks flottants, puisse être faite en grande série dans des chantiers maritimes spécialisés).

V.5.5 - Organisation de la sûreté

L'énergie nucléaire, née dans des conditions évoquées dans les paragraphes précédents, ne jouit pas d'une grande faveur dans l'opinion publique. Les raisons en sont multiples

a) En premier lieu, on confond bien souvent les utilisations militaires de l'atome avec ses possibilités dans le domaine civil ; (cette confusion est naturelle puisque "l'atome civil" est né de "l'atome militaire"), mais cette situation n'est pas spécifique à l'atome, elle est vraie dans beaucoup d'autres domaines (aéronautique , radar etc...) . L'Allemagne qui n'a aucune activité atomique à usage militaire a déjà une capacité industrielle nucléaire supérieure à la notre.

b) La radioactivité effraie, car la plupart du temps le public est mal informé de sa présence, de ses risques et de ses effets. Il y a certainement, de la part des gouvernements un effort important à entreprendre pour éduquer le public et le faire participer aux décisions. La radioactivité présente certes des dangers mais si des précautions correctes sont prises les risques sont minimes ; jusqu'à présent les connaissances sont restées l'apanage de spécialistes ; si l'on veut développer l'énergie nucléaire il faut certainement vulgariser les informations.

c) Jusqu'à un passé récent, il n'existait pas (en France, en particulier, mais dans la plupart des pays industriels également) d'organisme chargé de veiller officiellement à la sûreté des installations nucléaires. Depuis peu de temps de tels organismes se sont constitués, ils ont pour mission d'édicter des normes et des règles que doivent respecter les constructeurs et les exploitants d'installations nucléaires. Ces organismes doivent être autonomes afin de garder leur liberté de jugement. En France un tel organisme a été récemment créé au ministère de l'Industrie, il a la charge de distribuer les autorisations de construction et de veiller à leur fonctionnement, rien de ce qui est nucléaire ne peut se décider sans son accord. Un organisme semblable existe aux USA et dans tous les pays où la production d'énergie nucléaire a atteint le stade industriel.

IV.6 - LA SEPARATION ISOTOPIQUE

L'Europe (essentiellement l'Angleterre et la France) n'ayant pas eu les moyens de faire prévaloir la filière à uranium naturel, du finalement accepter la filière à uranium enrichi construite en Europe sous licence américaine (GE et Westinghouse). Ce choix comporte la nécessité d'un approvisionnement en uranium enrichi pour ces centrales.

Jusqu'à présent les seuls pays disposant d'installations industrielles capables de séparer l'uranium 235 sont les USA et la Russie ; la capacité des usines américaines et de loin la plus importante (28 millions d'unité de séparation isotopique)

La notion de travail de séparation qui caractérise l'énergie nécessaire pour enrichir l'uranium permet de définir une échelle fixant la valeur du produit en fonction de sa teneur en isotope 235 . L'unité de travail de séparation UTS à la dimension d'une masse et s'exprime donc en Kg. Il faut environ 0,23 millions d'UTS pour équiper un coeur de réacteur de 1000 MWe.

Les procédés permettant de séparer les isotopes de l'uranium sont nombreux mais jusqu'à présent seule la séparation isotopique par diffusion gazeuse a été industriellement exploitée. L'uranium mis sous forme gazeuse (UF_6) passe à travers des barrières constituées par une matrice poreuse (les trous doivent avoir un diamètre inférieur au libre parcours moyen des molécules gazeuses). Cette méthode oblige à utiliser un grand nombre de barrière car l'enrichissement de l' UF_6 au passage d'une barrière est très faible (les molécules d' UF_6 formées à partir de l' U_{235} diffusent plus vite que celles formées à partir de l' U_{238} ; il faut donc recycler de nombreuses fois le gaz.

Ce procédé est très couteux en énergie car il faut

- gazéifier l'uranium (UF_6)
- le maintenir dans toute l'usine au voisinage de 70 à 80°
- comprimer le gaz après chaque passage au travers des barrières pour compenser les pertes de charge importantes .

La quantité nécessaire à la séparation isotopique est de 2400 KWh/UTS. Ce procédé bien que couteux est parfaitement au point aussi bien en France qu'en Angleterre ou aux USA.

Un autre procédé concerne l'ultra centrifugation; sous l'action de la force centrifuge, les molécules d' UF_6 contenant de l'uranium 238 sont projetées à l'extérieur d'un bol tournant à très grande vitesse en quantité plus abondantes que les molécules contenant de l'uranium 235 : Il faut là encore, un grand nombre d'étages pour séparer efficacement les 2 isotopes. La vitesse de rotation doit être très élevée (la vitesse en périphérie atteint 2000 km/heure) ce qui pose des problèmes de mécanique et de tenue des matériaux qui ne sont pas encore tous résolus au niveau industriel ; l'intérêt de ce procédé réside dans son coût énergétique beaucoup plus modeste que celui correspondant à la diffusion gazeuse (environ 400 Kwh/UTS).

Pour alimenter les réacteurs à uranium enrichi il existe 2 solutions, ou bien s'adresser à l'étranger (pratiquement les USA) ou bien construire une usine en Europe.

Aux USA les clauses commerciales sont draconiennes, elles prévoient un engagement du client 8 ans à l'avance pour la fourniture d'une première charge d'uranium enrichi pour un réacteur et de 10 ans pour les recharges. Un versement à la commande portant sur le 1/3 de la valeur de la 1ère charge. Les conditions russes sont un peu plus souples, le coût est légèrement inférieur à celui de l'USAEC mais les capacités russes sont limitées, Les usines américaines utilisent des sources énergétiques bon marché. (centrales hydrauliques de la Tennessee Valley). Elles vendent pourtant l'uranium au prix de 32 \$ l'UTS. Ainsi les USA ont établi un monopole de fait dans la production et la vente de l'uranium 235.

Devant une telle situation il a été envisagé depuis longtemps de construire en Europe une usine de séparation isotopique. Le prix de l'énergie en Europe étant supérieur à celui pratiqué aux USA, le coût de l'uranium produit sera vraisemblablement plus élevé. En 1970 un groupement d'intérêt économique s'est créé comprenant la France, la Belgique, l'Italie, les 3 pays dits de la Troïka (Angleterre, Allemagne, Hollande) dans le but d'étudier la faisabilité d'une usine Européenne de diffusion gazeuse; après plusieurs mois de discussion, la Troïka s'est retiré du projet et la société Eurodif a été créé en 1972, Société Anonyme de droit français, les partenaires se sont mis d'accord pour la construction d'une usine ayant une production d'environ 9 millions d'UTS/an.

Le choix du site de construction s'est révélé délicat, mais il s'est finalement porté sur le site français du Tricastin (en bordure de Pierrelatte). La répartition du capital est la suivante : France CEA : 47,5 %

Italie CNEN Agip 2,25 %

Belgique Sybesi 10

Espagne Enusa 10

Suède Abatomenergie 10 %

la Suède devant ultérieurement abandonner sa participation, (celle-ci sera vraisemblablement repartagée entre les membres restants). L'usine sera en exploitation complète en 1983, mais les premières quantités d'uranium commenceront à apparaître vers 1979-1980. Cette usine sera alimentée en énergie par 4 centrales

nucléaire des 900 MWE chacune .

En supposant que l'usine soit en service de 1980 à 2000, elle mettra 10 mois à produire le combustible nécessaire à se produire, mais elle permettra la construction également de 30 centrales de 1000 MWE et l'entretien annuel de 20 centrales. La capacité de cette usine est insuffisante pour faire face aux besoins envisagés au-delà de 1985 et un autre groupement Urenco prévoit d'utiliser la technique de centrifugation. Cette technique permet d'accroître la capacité des installations au fur et à mesure des besoins (alors qu'il faut prévoir dès le début la taille d'une usine de diffusion gazeuse), il est envisagé que la capacité de production de cette société atteigne 10 MWT/an en 1985. De cette façon l'ensemble des besoins européens pourrait être à peu près satisfaite à condition que l'approvisionnement en uranium naturel soit assurée.

V.7 - LES RESSOURCES MONDIALES EN URANIUM

L'état le plus récent des ressources mondiales en uranium est celui qui résulte des travaux du groupe de travail de l'Agence Nucléaire de l'Energie Atomique, de l'OCDE et de l'AIEA. Les résultats disponibles sont inclus dans le tableau ci-joint. Mais ces évaluations obtenues par agrégation de celles fournies par les différents pays participants à l'OCDE appellent des commentaires.

Les principes utilisés en France pour l'évaluation des ressources correspondent assez bien à ceux de l'AEN/AIEA en ce qui

concerne les ressources assurées mais, les critères servant notamment à l'évaluation des ressources supplémentaires estimées ont été appliquées d'une manière plus libérale. De plus les réserves et ressources supplémentaires estimées sont fondées sur des coûts de production qui n'incluent, ni les amortissements des frais passés ni les marges habituelles de profit ; elles sont donc surestimées par rapport à ce qui sera économiquement exploitable.

De sorte que le Tableau ci-joint donne sans doute une vision légèrement surestimée des ressources générales du monde occidental. *Conclusion*

	Réserve raisonnablement assurées à moins de 1\$/lb d' U_3O_8 (10^3 tonnes d'uranium métal)	Réserve supplémentaires estimées à moins de 10\$/lb d' U_3O_8 (10^3 tonnes d'uranium métal).	Réserve raisonnablement assurées entre 10 et 15\$/lb d' U_3O_8 (10^3 tonnes d'uranium métal).	Ressources supplémentaires estimées entre 10 et 15\$/lb d' U_3O_8 (10^3 tonnes d'uranium métal)	Capacité de production prévue en 1975 (en tonnes d'uranium)
Argentine	9,2	14	7,7	10 ³ tonnes d'uranium métal	165
Australie	(71)	(78,5)	(29,5)	(29)	771
Brésil		25	0,7		
Canada	18,5	190	122	219	6500
Répub. Centrale Africaine.	8	8			
Danemark	5,6	10			
Finlande			1,3		
France	5,6	24,3	20	25	1800
Gabon	20	5		5	600
Inde			(2,3)	(0,8)	
Italie	1,2				92
Japon	2,8		4,2		30
Mexique	1,0		0,9		225
Niger	40	20	10	10	11500
Portugal (Europe)	7,4	5,9		10	114
Angola				13	
Afrique du sud	202	8	62	26	3813
Espagne	8,5		7,7		132
Suède			270	40	120
Turquie	2,2		0,5		
URSS	250	538	141	231	14600
Yougoslavie	6	10			
Zaire	1,7	1			
TOTAL (arrondi)	865	916	680	632	10000

TABLEAU No 1

V.7.1 - Equilibre des ressources et des besoins
mondiaux jusqu'en 1985.

Les prévisions de développement de l'énergie nucléaire publiées par les divers pays permettent d'évaluer les puissances nucléaires installées dans le monde occidental jusqu'en 1985 et les besoins d'uranium qui en résultent

TABLEAU XXIII (référence 2)

	1972	1975	1980	1985
Puissances installées en GWE	40	100	280	600
Besoins annuels en Uranium (tonnes U/an)	15000	27000	56000	105000
Besoins cumulés en Uranium (tonnes U)	15000	83000	300000	720000

Les quantités cumulées de 1972 à 1985 correspondent donc à 700 000 t d'uranium alors que l'industrie minière dispose actuellement de 865.000 tonnes. Le niveau des besoins annuels en 1985 de l'ordre de 100 000 tonnes implique (si on le compare aux 30 000 tonnes qui correspondent aux capacités existantes ou décidées actuellement), qu'un effort très important d'investissement de production soit entrepris. Mais cette capacité de 100 000 t devra s'appuyer sur des réserves permettant de satisfaire les besoins annuels pendant les 10 ans à venir, estimés à environ 15 millions de tonnes.

Compte tenu du niveau comparable des réserves actuelles (866000 t) et des prévisions de consommation cumulées jusqu'en 1985 (700.000 t) les réserves totales cumulées à démontrer d'ici là devront donc être de l'ordre de 1,5 million de tonnes.

Il faut 8 à 10 ans entre le moment où un gisement est reconnu et celui où sa mise en exploitation est effective ; il y a donc une certaine urgence à poursuivre et à développer la prospection des gisements d'uranium.

Jusqu'à présent, la prospection a été surtout faite dans les régions terrestres les plus accessibles en Europe, en Amérique du Nord. De vastes territoires restent encore à prospecter (Asie, Afrique, Océanie), les techniques de prospection s'améliorent sans cesse, il ne devrait pas y avoir de difficultés pour assurer la couverture des besoins en uranium jusqu'en 1985 si les efforts nécessaires sont réalisés à temps.

Besoins en uranium au delà de 1985.

Au-delà de 1985 le ralentissement de la croissance des besoins en uranium sera fonction du rythme de développement des surgénérateurs, donc de leur degré de réussite économique et commerciale ainsi que de leur performances futures du point de vue de l'économie des matières fissiles (facteur de breeding).

Si toute la puissance nucléaire (de l'ordre de 3000 GWe) était en l'an 2000 installée en centrales à eau légère, les besoins annuels seraient de l'ordre de 450 000 t et les besoins

cumulés de 1985 à 2000 de 4 millions de tonnes. Ce chiffre est inférieur aux ressources mondiales en uranium actuellement connues (3 millions de tonnes d'après le tableau.)

La nécessité de réduire la consommation d'uranium naturel impose le développement des réacteurs à neutrons rapides. Dans cette perspective les évaluations de l'USAEC en mars 1973 sont les suivantes :

TABLEAU XXIV référence 4

Année	Puissance nucléaire installée en GWE	
	USA	Hors USA (monde occidental seulement)
1980	132	140
1985	280	303
2000	1200	1460

Dans ce tableau on admet que

1°) les surgénérateurs seront commercialisés à partir de 1986 aux USA et dans le monde et que la puissance installée en réacteurs à neutrons rapides sera de 31 GWE en 1990 et 415 GWE en 2000 ;

2°) les réacteurs à haute température constitueront 10 % des installations nucléaires en 1980-90 et 15% en l'an 2000. Ce programme correspondrait à environ 3 millions de tonnes d'uranium cumulées à l'an 2000 ; ce qui équivaut à la totalité des ressources actuellement connues.

Pour se maintenir au niveau des 3 millions de tonnes d'uranium d'ici l'an 2000 il faut donc développer les surgénérateurs et les réacteurs à Haute Température.

Sans ces modèles de réacteurs :

- la demande d'uranium sera de plus en plus forte et son prix s'accroîtra dans l'avenir comme il en est aujourd'hui pour le pétrole,
- l'utilisation de l'uranium est très mauvaise et le cycle du combustible conduit à un gaspillage.
- le plutonium produit dans les réacteurs à eau en quantité abondante, conduit à envisager son utilisation soit dans les surgénérateurs, soit dans les réacteurs à eau.

V.7.2 - Besoins français à long terme en uranium selon diverses hypothèses de développement nucléaire

En admettant que la croissance en énergie, qui est actuellement 5 % par an, passe progressivement à 4 % vers l'an 2000 et qu'à cette date la part de l'électricité dans la consommation soit de l'ordre de 45 % (la proportion d'électricité d'origine nucléaire étant alors de 80 %), 3 hypothèses ont été développées concernant l'évolution de l'énergie nucléaire en France.

- 1) hypothèse 1 seule la filière à eau ordinaire (PWR et BWR) est développée
- 2) hypothèse 2 la filière à eau ordinaire est développée, en outre le plutonium produit sert à alimenter des surgénérateurs, c'est

le régime dit antarchique

3^e) hypothèse 3 : elle envisage une pénétration progressive des réacteurs à haute température; 2 éventualités étant considérées :

- cycle thorium avec démarrage à l'uranium très enrichi,
- cycle uranium moyennement enrichi.

Le schéma correspondant à l'hypothèse 1 ne comporte que des réacteurs à eau légère complétés par les réacteurs graphite gaz existants (UNGG) et 3 réacteurs rapides FBR actuellement décidés :

Phénix (23 MWE) en 1973,

part française du 1er réacteur 1200 MWE FBR (610 MWE
installé en 1980)

part française de 2ème réacteur de 1200 MWE FBR
(610 MWE installé 1982)

Le schéma correspondant à l'hypothèse 2 consiste à envisager l'implantation des réacteurs rapides en France au fur et à mesure de l'obtention du plutonium issu des réacteurs à eau légère (le stock de Pu est supposé nul au 1.1.73).

Le schéma 3 et 3 bis vise à disposer en l'an 2000 d'une puissance cumulée de 25 % de réacteur HTR au thorium et à l'uranium 235; deux sous programmes ont été examinés, l'un envisage le développement des HTR au thorium à l'uranium 235, l'autre admet que 10 % des HTR fonctionne à l'uranium 235. On aboutit alors au tableau suivant :

TABLEAUX XIV REFERENCE 10

	Hypothèse 1 LWR	Hypothèse 2 LWR	FBR	Hypothèse 3 LWR FBR		HTR	Production nuclé- aire total y compris UNGG
1975	1055	1055	235	1055	235	0	3770
1980	10035	10035	345	10035	845	1200	13360
1985	28935	28935	1035	26535	1035	2400	32450
1990	63735	55335	9435	48135	8235	8400	67250
1995	104535	86535	19035	68535	16635	20400	108050
2000	154535	118545	37035	82635	2635	40400	158050

LWR = réacteur à eau légère

FBR = réacteur surrégénérateur au Pu

HTR = réacteur à haute température

UNGG = réacteur à uranium naturel graphite gaz.

Besoins français en uranium naturel selon les divers schémas (en tonnes).

TABLEAU XXV (10)

	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3	Hypothèse 3 bis
	quantités annuelles.			
1975	1500	1500	1500	1500
1980	4800	4800	4800	4800
1985	8100	7500	6900	7500
1990	13800	11400	10600	11400
1995	19700	15800	14200	15800
2000	28000	18700	16400	18700

		quantités cumulées		
1975	3700	3700	3700	3700
1980	18100	18100	17800	17900
1985	50700	48900	47800	48600
1990	108100	98600	93800	96800
1995	195200	168900	158500	164400
2000	317300	260200	237700	250300

Ces tableaux ont été réactualisés récemment dans la nouvelle édition du rapport PEON en prenant en compte une hypothèse supplémentaire correspondant à une utilisation du plutonium dans les réacteurs P ou BWR. Ce plutonium, au lieu d'être utilisé pour permettre la construction de réacteurs à neutrons rapides sert à fabriquer des éléments de combustible au plutonium destinés à être utilisés dans les réacteurs à eau. Les besoins français en uranium ne sont, dans cette hypothèse pas sensiblement affectés. L'industrie de l'uranium devra donc faire face à une demande rapidement croissante au moins jusqu'en 1985. Pour démontrer d'ici 1985 le 1,5 million de tonnes supplémentaires nécessaires il faut qu'un effort important soit entrepris sur le plan de la prospection, il y a tout lieu de croire (compte tenu des territoires prospectés jusqu'à présent) que cet uranium doit exister. La France est relativement bien placée dans ce domaine, d'une part elle possède des ressources nationales non négligeables (capacité actuelle de production 1800 t/an) de plus elle contrôle environ 10% des ressources mondiales (Afrique Centrale, Canada, Afrique du Sud), enfin, profitant des bas prix de l'uranium, elle a effectué des achats importants de minerais lui assurant un volant de sécurité important.

Afin que le prix de l'uranium ne s'accroisse pas abusivement, (obligation d'utiliser des minerais pauvres), il est indispensable de mieux utiliser le combustible fissile que ne le font actuellement les réacteurs à eau légère d'origine américaine. Il faudra donc à moyen terme développer les surrégénérateurs qui consommeront le plutonium qui aura été produit en quantité abondante (20 tonnes environ) par les réacteurs à eau. Peut-être faudra-t-il également avant l'an 2000 développer une filière au thorium qui permettra également de réduire les demandes en Uranium si son prix s'élevait trop fortement.

Pour conclure, il nous paraît raisonnable de penser que les ressources mondiales connues en uranium autorisent les pays pauvres en énergie fossile (comme l'Europe et la France en particulier) à se lancer dans l'ère nucléaire sans crainte de pénurie à court terme et moyen terme de l'uranium.

Pour clore ce chapitre sur l'énergie de fission, il nous paraît utile d'exposer très brièvement la situation énergétique de l'URSS.

V.8 - LA POSITION DE L'URSS CONCERNANT LE DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

L'URSS est actuellement le seul grand pays industriel qui se suffise pratiquement à lui-même du point de vue énergétique

et qui puisse continuer à le faire pendant des décennies . L'URSS possède entre autres les plus grandes réserves mondiales de charbon et de gaz naturel et des ressources énormes en pétrole encore peu entamées et seulement partiellement recensées. La production de pétrole a atteint en 1971, 380 millions de tonnes et vise 500 millions en 1975. L'abondance et la richesse des gisements de gaz naturel permet d'espérer une production annuelle de gaz de 350 millions de m³ de gaz en 1975. L'URSS n'a donc pas à faire face comme les USA ou l'Europe à un risque de pénurie énergétique; cependant il faut noter que son niveau de développement industriel est encore loin d'avoir atteint celui du monde occidental et que ces besoins sont en pleine expansion ; elle doit en outre faire face aux demandes des pays européens qu'elle contrôle et qui sont en général mal pourvu de ressources énergétiques.

L'URSS semble vouloir mettre en valeur les ressources énergétiques de la Sibérie, elle cherche pour cela les appuis des nations occidentales ce qui lui assurerait à la fois une aide financière et technologique importante et consoliderait sa position vis à vis d'éventuelles contestations territoriales de la Chine.

Le développement nucléaire de l'URSS n'apparaît pas avec le même impératif que pour l'Europe, l'URSS dispose certes d'une technologie nucléaire très importante constituée principalement pour des besoins militaires mais elle semble peu disposée à se lancer sur une grande échelle dans la production d'énergie nucléaire industrielle. Elle a, comme les USA, et pour les mêmes raisons, développer des réacteurs refroidis à eau et utilisant de l'uranium

enrichi pour ses sous-marins et des brises-glaces ; elle a également développé des réacteurs à neutrons rapides et elle tient dans cette voie une place honorable.

Pour terminer ces brèves considérations, sur les problèmes énergétiques de l'URSS, on constatera qu'elle a suivi une technologie voisine de celle des USA et que pour elle, rien ne justifie un grand empressement à se lancer en grand dans la production industrielle d'énergie nucléaire. Elle explore très efficacement l'énergie de fusion et est à l'origine de progrès importants dans ce domaine (Tokamak).

C H A P I T R E V I

L'ENERGIE THERMO NUCLEAIRE.

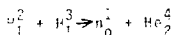
1.1 - INTRODUCTION

On veut produire de l'énergie en très grande quantité et pendant un temps très court à partir des réactions de fusion. La recherche d'une solution permettant la production continue ou quasi continue d'énergie de fusion en quantité industrielle exploitable constitue l'objectif des travaux sur la fusion contrôlée.

La mise en évidence de la production massive de l'énergie est d'origine militaire. Cette démonstration fut faite après la guerre par les américains d'abord, par les russes ensuite; les anglais, les français et enfin les chinois réussirent ultérieurement cette démonstration. L'utilisation industrielle de l'énergie de fission n'a pas encore eu lieu; si l'on sait libérer de grandes quantités d'énergie de fusion pendant des temps très courts on ne sait pas encore produire cette énergie en petite quantité et pendant des temps longs (ou à intervalle de temps rapproché). Des travaux sont en cours dans les principaux pays du monde pour atteindre cet objectif, celui-ci est d'autant plus séduisant que l'énergie de fusion utilise un combustible abondant, et ne produit pas de résidus radioactifs. Pendant longtemps les recherches dans ce domaine sont restées secrètes puis, il est apparu que les problèmes à résoudre étaient tellement nombreux que seule une coopération internationale pourrait permettre leur résolution.

VI.2 - RAPPEL DE PRINCIPE

Dans les réactions de fusion, il s'agit de produire des réactions nucléaires entre les noyaux eux-mêmes (sans utiliser de projectile comme le neutron). Pour que de telles réactions puissent avoir lieu, il faut que, les noyaux soient animés les uns par rapport aux autres d'une très grande vitesse, leur permettant de vaincre leur répulsions coulombiennes réciproques, ce qui ne peut se produire qu'en leur communiquant de très grandes vitesses d'agitation thermique c'est à dire, en les portant à des températures fort élevées. La température à laquelle doit être portée la matière afin de permettre aux noyaux la constituant "d'entrer en collision" et d'y subir des réactions thermo nucléaires est, pour les noyaux les plus légers (comme les isotopes de l'hydrogène le deutérium et le tritium) qui ont une barrière de potentiel coulombienne relativement basses de l'ordre de la centaine de millions de degrés. A cette température, la matière est à l'état de plasma, les atomes, la constituant sont dissociés totalement ou partiellement en noyaux et en électrons. Dans un tel milieu les particules (noyaux et électrons) tendent à se combiner constamment mais, les grandes vitesses d'agitation thermique auxquelles elles sont portées, d'une part, brisent ces liaisons et permettent, d'autre part, à certains noyaux de subir le phénomène de fusion nucléaire en se combinant entre eux pour former ensuite d'autres éléments. On conçoit qu'un tel milieu soit le siège de nombreuses instabilités par suite des multiples interactions qui s'y produisent. L'une des réactions les plus faciles à réaliser est la suivante :



14 Mev 3,5 Mev

${}^2_1\text{H}$ = Noyau de deutérium ${}^1_0\text{n}$ = neutron

${}^3_1\text{H}$ = Noyau de tritium ${}^4_2\text{He}$ = Particule α

Cette réaction est exothermique et sur les 17,5 Mev libérés, 14 Mev apparaissent sous forme d'énergie cinétique des neutrons émis. A titre de comparaison, une réaction de fission produit environ 200 Mev dont la majeure partie (80%) concerne l'énergie cinétique des fragments de fission, les neutrons n'ayant qu'une énergie de l'ordre de 2 Mev. Les réactions de fusion deutérium-tritium (D,T) émettent donc, à énergie libérée égale 7 fois plus de neutrons que les réactions de fission, par contre, à masse égale, la fusion produit 8 fois plus d'énergie que la fission.

L'obtention des conditions nécessaires pour produire des quantités massives d'énergie thermonucléaire est réalisée dans les bombes H. Comment faire pour réussir à produire un plasma de deutérium-tritium, le chauffer et le maintenir de façon à ce qu'il ne vienne pas en contact avec des parois matérielles quelconques, puis extraire industriellement l'énergie produite ? Les recherches dans ce domaine ont commencé juste après la dernière guerre, elles ont longtemps stagné et semblé utopiques à certains. Deux solutions paraissent actuellement se dégager de l'ensemble des travaux entrepris et avoir la chance d'aboutir dans un avenir encore lointain cependant, à une production d'énergie permettant une exploitation industrielle. Elles en sont l'une et l'autre au

stade de la démonstration de principe. Ces deux solutions concernent :

- le confinement du plasma par des champs magnétiques de forte intensité afin d'éviter tout contact avec des parois matérielles ;
- la micro-explosion thermonucléaire dégageant une quantité d'énergie suffisamment faible pour être contenue dans une enceinte de taille et de constitution raisonnables.

V.13 - CONFINEMENT MAGNETIQUE

V1.3.1 - Principe

Les particules constitutives d'un plasma placé dans un champ magnétique sont contraintes de suivre, dans des directions opposées suivant leur charge, des trajectoires s'enroulant autour des lignes de force du champ magnétique. Si ce champ est suffisamment intense pour que la pression magnétique de confinement soit du même ordre de grandeur que la pression cinétique

du plasma $\left(\frac{B^2}{8\pi} = 2nkT\right)$

B = champ magnétique (gauss)

n = nombre de particules /cm³

k = constante de BOITZMAN

T = température.

et si ces lignes de force ont une forme adéquate on peut espérer emprisonner le plasma suffisamment longtemps pour que certains noyaux "entrent en collision" et donnent lieu à des réactions

thermonucléaires. La durée du confinement ainsi réalisée ne peut être que limitée, tous les "chocs" ne produisent pas de réactions génératrices d'énergie, certains d'entre eux sont purement "diffusants", de sorte qu'en l'absence de précautions particulières, les particules réussissent à s'échapper du piège magnétique au bout d'un certain temps. Les objectifs à atteindre pour que l'énergie produite soit du même ordre de grandeur que celle qu'il a fallu mettre en oeuvre pour créer le plasma, le chauffer, le confiner suffisamment longtemps, sont bien connus ; ils s'expriment par les relations suivantes :

$T = 10^8$ degrés, $n \approx 10^{14}$ τ = temps de confinement.

VI.3.2 - Où en est-on ?

L'obtention d'une configuration magnétique satisfaisante pour atteindre un tel objectif a fait l'objet de nombreux travaux ; l'une de celles qui semble actuellement la plus prometteuse a été conçue initialement à l'Institut KURCHATOV à MOSCOU, il s'agit du TOKOMAK, Le plasma y est confiné dans un tore cylindrique dont le petit rayon est de l'ordre de 20 cm et le grand rayon est de l'ordre de 100cm. Le principe des TOKOMAK est le suivant :

a) Le confinement est réalisé par deux champs magnétiques différents :

- . L'un B_{z0} est créé par des bobines entourant le tore, il est dirigé suivant la flèche 1
- . L'autre B_{θ} est créé par un très fort courant électrique circulant dans le plasma, il est dirigé suivant la flèche 2.

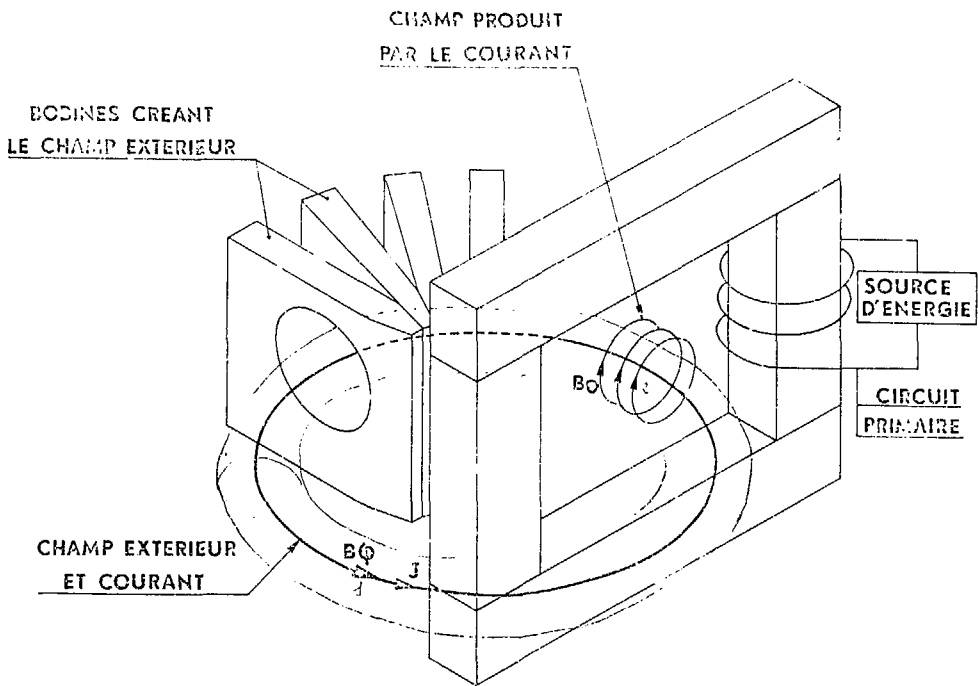
Ces deux champs se combinent pour créer un réseau de lignes de force qui enserrant le plasma et le confine le mieux possible.

b) En outre, le courant électrique circulant dans la spire en court circuit constituée par l'anneau du plasma et créant le champ B_{θ} sert à échauffer le plasma par effet Joule.

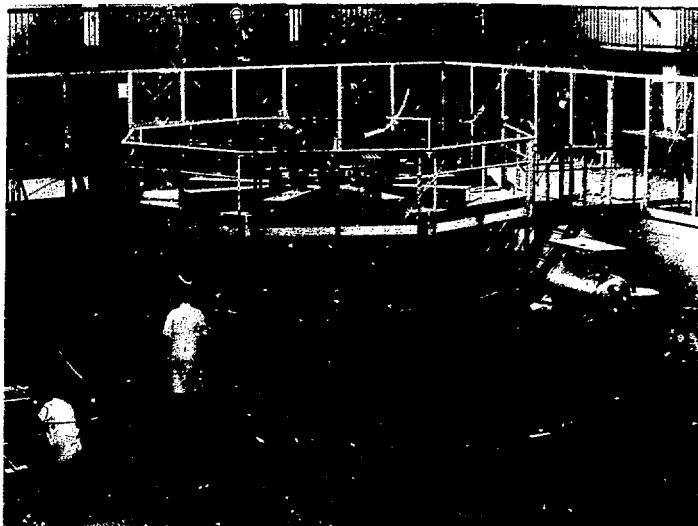
Ces configurations connaissent actuellement des succès certains. Les multiples problèmes que posent ces installations ne sont pas encore tous résolus mais on commence à mieux comprendre les principaux phénomènes.

De nombreuses machines de ce type sont en étude ou en construction dans le monde ; l'une des plus performantes, celle du CEA à Fontenay a récemment atteint les résultats suivants :

$$n = 10^{14} \text{ cm}^{-3} = 0,05 \text{ s d'ou } n\tau = 5 \times 10^{12} \text{ et } T = 2 \times 10^7 \text{ degrés.}$$



PRINCIPE DU TOKAMAK



Le Tokamak
du Centre d'Etudes Nucléaires
de Fontenay-aux-Roses (France)

Il est vraisemblable que les résultats meilleurs vont prochainement être obtenus à l'étranger (aux USA en particulier) ; on entrevoit des solutions pour aller plus loin et pour atteindre les objectifs définis précédemment ; elles seront coûteuses et ne peuvent se concevoir que dans de larges contextes scientifiques et industriels (USA, URSS, EUROPE).

IV.3.3 - Les objectifs à atteindre , les performances actuelles, les étapes.

Les objectifs à atteindre ont été depuis longtemps définis par un physicien anglais LAWSON. Pour produire des réactions thermonucléaires avec un mélange deutérium tritium (ce qui correspond au cas le plus facile à réaliser) qui délivrent autant d'énergie qu'il faut en dépenser pour créer le plasma et le porter à la température correcte, il faut atteindre les conditions suivantes : le produit $n\tau$ doit être de l'ordre de 10^{14} et la température de l'ordre de 100 millions de degrés.

On constate qu'il faut gagner un facteur 20 sur le temps de confinement et un facteur 5 sur la température. Comment faire pour aller plus loin ?

Plus la température du plasma est élevée moins il est résistif donc le chauffage par effet joule paraît limité. On projette alors de parfaire le chauffage en injectant des particules neutres possédant de grandes énergies pour leur permettre de franchir sans problème les barrières magnétiques de confinement. En "heurçant" les noyaux du plasma déjà très chaud, ces particules

accroîtront encore sa température. Cet effet a déjà été mis en évidence et les dispositifs technologiques appropriés sont en construction dans divers laboratoires.

L'accroissement de la durée de vie du plasma est favorisé par l'agrandissement des dimensions du cordon de plasma.

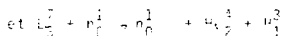
Les objectifs poursuivis aux USA et en URSS visent à essayer de réaliser la démonstration de faisabilité de cette filière TOKOMAK dans les dix prochaines années ; dans ce but, des installations de grandes tailles sont en construction et des projets de démonstration plus ambitieux sont à l'étude. Les pays européens sous l'égide de l'EURATOM ont de leur côté décidé d'étudier un avant projet de grandes dimensions.

La production d'énergie industriellement utilisable à partir d'une machine type TOKOMAK pose de nombreux problèmes technologiques dont l'inventaire est loin d'être achevé. En premier lieu, on notera que la production d'énergie dans un réacteur du type TOKOMAK ne peut qu'être discontinue puisque le courant électrique circulant dans l'anneau de plasma disparaît au bout d'un certain temps (de l'ordre d'une dizaine de minutes). Des solutions sont à l'étude pour remédier à cet inconvénient mais elles n'ont pas encore été expérimentées.

Plusieurs solutions ont été proposées pour extraire l'énergie produite dans une machine du type TOKOMAK ; celle qui est généralement envisagée est la suivante :

Lors des réactions de fusion deutérium tritium 80 % de l'énergie créée apparaît sous forme d'énergie cinétique des neutrons produits ; il faut donc ralentir ces neutrons puis les capturer ; on envisage alors de disposer autour du tore contenant le plasma une épaisse couche de lithium (ordre de grandeur 70 à 100 cm). Le rôle du lithium est triple :

1. D'une part, il ralentit et capture énergiquement les neutrons en reproduisant le tritium consommé par les réactions thermonucléaires selon les réactions :



On peut montrer que le bilan neutronique de ces réactions est tel qu'il se produit plus de tritium qu'il n'en est consommé de sorte qu'il apparaît comme pour les réacteurs rapides une sorte de facteur de breeding.

2. D'autre part, il sert d'écran neutronique pour protéger les dispositifs divers existant autour du tore (bobine créant le champ magnétique etc.)

3. Enfin, lors du ralentissement des neutrons puis lors de leur capture, le lithium s'échauffe fortement il peut alors servir de source chaude permettant, au travers d'un échangeur adéquat de produire de la vapeur actionnant des turboalternateurs.

De nombreux problèmes technologiques devront être résolus avant d'atteindre ce stade. A titre d'exemple, on citera (en suivants), a) l'enceinte à l'intérieur de laquelle se trouve le plasma devra résister à l'intense flux de neutrons de 14 Mev (de l'ordre de quelques 10^{14} neutrons /cm²/sec) issus du plasma, au rayonnement électromagnétique, aux diverses particules chargées s'échappant du plasma etc...

b) La création de champ magnétique élevé (de l'ordre de 50 à 100 KG) dans des volumes importants (de l'ordre du m³) nécessitera vraisemblablement l'emploi d'enroulements supraconducteurs (pour éviter que les pertes ohmiques ne soient excessives) posant des problèmes multiples (mécanique, cryogénique, tenue des efforts, tenue au rayonnement, alimentation électrique, stockage de très grandes quantités d'énergie magnétique etc...).

c) La mise en oeuvre de quantité importante de tritium (de l'ordre de plusieurs kilogrammes) devra également faire l'objet d'études particulières ; il faut injecter le tritium dans le plasma, extraire les imbrûlés, procéder à l'extraction du tritium formé dans le lithium, contrôler les fuites éventuelles de tritium, etc...

L'utilisation de cet élément sous forme gazeuse nécessite des précautions particulières, du fait de sa radioactivité et de sa forte capacité de diffusion à travers les parois. Les risques se trouvent néanmoins minimisés en raison des très faibles pressions régnant dans l'enceinte de confinement.

d) Extraire la chaleur produite dans le lithium soit en pompant ce dernier (ce qui paraît difficile par suite des pertes de charges importantes dues à la présence des forts champs magnétiques de confinement), soit en utilisant l'hélium comme fluide caloporteur intermédiaire.

e) Des protections neutroniques, photoniques et thermiques efficaces devront protéger les enroulements supraconducteur maintenus à très basse température (et pourtant à proximité d'un plasma dont la température est de l'ordre de 100 millions de degrés).

f) La production d'énergie de fusion dans une machine du type de celle décrite précédemment est nécessairement importante ; il est difficile de concevoir, toutes considérations économiques mises à part des installations dont la puissance soit inférieure à quelques gigawatts électriques (de 5 à 10 semble un bon ordre de grandeur).

g) L'approvisionnement initial de tritium, obtenu par irradiation de lithium dans les réacteurs nécessitera au démarrage des quantités de l'ordre de quelques kilogrammes. Les nécessités ultérieures correspondant à des installations industrielles seraient assurées grâce au taux de surrégénération du tritium dans les réacteurs en fonctionnement.

Les nombreux travaux effectués en vue de la production d'énergie de fission pourront certes apporter une contribution importante dans le domaine de la fusion (études neutroniques, tenue

sous radiation, radiométallurgie etc..., mais il paraît peu vraisemblable que la mise au point de réacteurs à fusion d'un modèle voisin de celui envisagé précédemment puisse être réalisée avant la fin de ce siècle.

Avant de songer à cette étape, il convient, au stade actuel, d'entreprendre l'étude de l'avant projet d'une machine destinée à faire la démonstration de faisabilité des principes de base. Une telle étude permettra de préciser les difficultés, de mieux définir les étapes et d'estimer le coût d'ensemble d'un tel programme.

VI.4 - LA MICROEXPLOSION THERMONUCLEAIRE.

VI.4.1 - Principe

L'énergie produite par fusion complète d'un milligramme de deutérium-tritium est de l'ordre de 300 mégajoules (soit environ l'équivalent de 80 kg de TNT) ; si l'on veut "contenir" l'énergie produite dans un dispositif qui ait des dimensions considérées comme "raisonnables" ; il ne faut brûler que des quantités très faibles de matière (de l'ordre d'une fraction de milligramme par exemple). Pour que les réactions thermonucléaires puissent se produire, il faut porter le mélange DT à quelques dizaines de millions de degrés en un temps plus court que celui correspondant à la dislocation de cette matière. La combustion n'est évidemment pas instantanée de sorte qu'il y a compétition entre le temps de production des réactions thermonucléaires et le temps de disloca-

tion dont l'ordre de grandeur dépend de celui de la vitesse du son dans la matière à cette température ($=10^8$ cm/s). En examinant les conditions à satisfaire on arrive à la conclusion qu'il faut comprimer la matière fusible et que les lasers constituent l'une des sources capables de délivrer les quantités d'énergie requises pendant une durée de temps inférieure au temps de dislocation. L'idée consiste alors à irradier une microbille contenant des matériaux fusibles par un nombre de faisceaux laser suffisants pour réaliser une compression aussi isotrope que possible. Schématiquement, on peut admettre que lors de l'interaction du faisceau laser avec la matière, cette dernière est évaporée très rapidement et il en résulte, en particulier, un effet analogue à "l'effet force" qui, si la matière est sous forme sphérique et le faisceau, permet de comprimer et de chauffer fortement la partie restante.

VI.4.2 - QU'EN EST-ON ?

Les principes qui viennent d'être rappelés ont été publiés assez récemment par les Américains en particulier dans le document intitulé "Laser Induced thermonuclear fusion" by John NUCKOLLS et John EMMET and Lowell WOOD édité dans la revue Physics Today, août 1973, mais les travaux ont en fait commencé depuis longtemps. Les études numériques montrent qu'il est possible d'atteindre les conditions de température, de densité, de concentration permettant la production d'énergie thermonucléaire dans des microbilles de 10^{-2} cm de diamètre.

Il faut pour réussir, disposer de lasers très puissants ; les meilleurs d'entre eux permettent actuellement de délivrer une énergie de l'ordre de plusieurs centaines de joules en quelques nanosecondes ; pour réussir la démonstration de principe, il faut que ces lasers produisent une énergie de l'ordre d'au moins 10 kilojoules en des temps inférieurs à la nanoseconde, ils doivent en outre permettre de moduler la puissance du faisceau laser pour réaliser les conditions optimales de concentration. Les progrès réalisés par les lasers ont été spectaculaires ces dernières années, si cette croissance se poursuit la démonstration de faisabilité" de la micro-explosion est prévisible dans les prochaines années à venir (entre 2 et 5 ans disent les plus optimistes aux USA. Les RUSSES et les AMERICAINS font dans ce domaine un effort comparable à celui qu'ils consentent pour le confinement magnétique. En EUROPE, l'effort principal est semble-t-il fait en France tant en ce qui concerne la fabrication des lasers (CGE) que dans le domaine théorique et expérimental (CEA). Les résultats obtenus dans l'un et l'autre domaine comptent d'ailleurs parmi les meilleurs au monde.

VI.4.3 - La production d'énergie

Comment faire pour extraire l'énergie produite dans une microexplosion thermonucléaire ? La réalisation de la "Chambre de combustion" pose de multiples problèmes dont l'inventaire n'est pas totalement fait. Plusieurs solutions ont été étudiées aux USA, l'une d'elles concerne une chambre sphérique de l'ordre de 300 cm de rayon capable de "contenir" des explosions délivrant 10^7 joules

à une cadence suffisante pour permettre une production quasi continue de l'énergie en chauffant du lithium comme dans le confinement magnétique. Mais les difficultés technologiques sont nombreuses. Comment faire par exemple pour permettre aux multiples faisceaux lasers de pénétrer dans la chambre, y introduire la sphère de deutérium-tritium tout en réalisant des protections neutronique, photonique thermique suffisamment efficace. L'extraction d'énergie pose également des problèmes difficiles, mais il faut avant tout que les performances des lasers s'accroissent encore ; leur rendement qui n'est encore que de quelques pour cent devra être considérablement accru. La technologie des lasers intéresse de nombreux domaines et il est permis d'être optimiste sur la poursuite d'un développement encore trop récent pour imaginer qu'il ait déjà atteint ses limites.

VII.5 - ENERGIE DE FISSION - ENERGIE DE FUSION.

Si les espoirs placés dans le développement actuel de la fusion se confirment et si les moyens financiers le permettent, il est vraisemblable que la démonstration de principe de l'une ou l'autre des deux solutions envisagées précédemment, peut-être les deux, sera faite dans les 5 à 10 prochaines années. Par contre, il est peu probable que les réacteurs à fusion puissent produire industriellement de l'énergie avant la fin de ce siècle, époque à laquelle il est vraisemblable que de nombreux réacteurs à fission à neutrons thermiques et rapides seront en fonctionnement. Au stade actuel des connaissances et des travaux, les études économiques n'ont que peu de valeur ; tout au plus, peut-on dire que le prix

du combustible (qui n'entre déjà pas pour une part déterminante dans le prix du courant électrique d'origine fissile) sera pour les réacteurs utilisant du combustible "fusible" certainement très modeste et qu'il ne posera aucun problème d'approvisionnement. Deux arguments sont souvent évoqués au sujet de l'intérêt de l'énergie de fusion ; ils concernent

- . L'impossibilité de concevoir des accidents libérant rapidement une grande quantité d'énergie ;
- . L'absence de production des résidus radioactifs à longue vie.

Les risques concernant l'énergie de fission ont fait l'objet de nombreux travaux ; l'énergie de fusion contrôlée a encore à faire la démonstration de son existence, puis de son développement ; il est exclu de comparer l'une, ayant déjà fait ses preuves, avec l'autre pour le moins encore incertaine ; il est par ailleurs facile de comparer les défauts de ce que l'on possède avec les avantages de ce que l'on souhaite. Tout au plus peut-on envisager des différences entre les phénomènes élémentaires mis en oeuvre.

Les réacteurs à fission contiennent une quantité importante de matière fissile dont la combustion ne peut en aucun cas aboutir à un régime explosif ; cette quantité de matière fissile fait souvent l'objet de critique par suite des risques potentiels qu'elle représente.

Dans les réacteurs à fusion utilisant l'un ou l'autre des deux principes évoqués précédemment, la matière fusible n'est apportée dans le réacteur que par quantité très faible, il peut évidemment exister des conditions de fonctionnement stables et d'autres qui ne le sont pas, mais comme on ne brûle que ce que l'on apporte et qu'il n'est pas nécessaire de rassembler beaucoup de matière fusible pour la brûler, les risques de libération explosive de grandes quantités d'énergie de fusion sont totalement exclus.

La libération explosive d'énergie nucléaire dans les réacteurs est hautement improbable dans un cas et non envisageable dans l'autre : ainsi, les réacteurs nucléaires offrent d'excellentes garanties ; cependant les réacteurs à fission contiennent une importante quantité d'éléments radioactifs qui nécessitent des conditions particulières de confinement de sorte que l'autre argument fréquemment utilisé au sujet de l'énergie de fusion concerne l'absence de production d'éléments radioactifs.

Les seuls résidus radioactifs dont les réacteurs à fusion pourraient être à l'origine concernent l'irradiation des éléments de structure (enceinte de confinement du plasma, élément constitutifs de chambre d'explosion par exemple) : aucun fragment de fission ni actinide ne peut évidemment être produit. Sera-t-il possible de choisir des matériaux, qui sous l'influence du flux neutronique très élevé émis par le plasma ne deviennent pas trop radioactifs ? C'est peu probable dans la méthode utilisant le confinement magnétique, ce n'est peut-être pas totalement exclu dans les micro explosions.

Il ne faudrait pas en conclure à l'absence de tout risque concernant les réacteurs à fusion.

a) Une centrale à fusion de 1000 mégawatts électriques consommera 0,5 kg de tritium par jour. La quantité de tritium mise en oeuvre par une centrale nucléaire à fusion de 5 gigawatt utilisant le confinement magnétique aurait été de l'ordre de plusieurs kilogrammes ; la manipulation de telles quantités de gaz radioactif avec un haut degré de sûreté pose des problèmes certainement très difficiles. La possibilité de brûler le tritium à l'état solide dans les micro-explosions est à ce point de vue plus satisfaisante.

b) Les risques radioactifs potentiels des réacteurs à fusion paraissent inférieurs à ceux des réacteurs à fission de même puissance (en y incluant les risques des usines de retraitement associées). Mais des risques nouveaux apparaîtront ; ils concernent par exemple les problèmes de stockage d'énergie, qu'il s'agisse de ceux concernant l'énergie magnétique emmagasinée dans un réacteur à fusion à confinement magnétique (de l'ordre de 4×10^{10} joules) vraisemblablement stockée dans des supraconducteurs ou encore ceux concernant l'énergie de pompage des lasers.

Peut-on espérer produire de l'énergie de fusion en utilisant des réactions thermonucléaires qui ne produisent pas de neutrons (donc qui ne produisent pas d'éléments radioactifs) et qui n'utilise pas de tritium ? Il existe d'autres réactions que la réaction deutérium-tritium, mais elles sont encore plus diffi-

ciles à produire. Si l'on pouvait par exemple réussir à chauffer davantage encore et à confiner un peu mieux la réaction $H_1^1 + B_5^{10}$ serait particulièrement intéressante. Si une telle possibilité apparaissait les réacteurs à fusion ne seraient pratiquement plus générateurs de déchets radioactifs. Mais nous n'en sommes pas encore à ce stade.

VI.6 - PERSPECTIVE DE L'ENERGIE DE FUSION

Les travaux de recherche sur l'énergie de fusion se poursuivent simultanément aux USA en URSS et en Europe. Alors que les activités de l'EURATOM dans les autres domaines nucléaires sont fortement contestées par de nombreux pays européens, l'accord et la coopération de ces pays se maintiennent en ce qui concerne la fusion ; toutes les recherches européennes sur la fusion par voie magnétique se font dans le cadre de l'Euratom (jusqu'à présent les travaux sur le confinement inertiel en sont exclus). L'Europe dépense dans ce domaine la même somme d'argent que les USA, elle tient une place honorable dans les travaux scientifiques effectués. En général on s'accorde à penser que :

+ La démonstration de principe de la fusion par laser sera faite dans les 3 à 5 années à venir (vraisemblablement aux USA en premier).

+ La démonstration de principe de la fusion par confinement magnétique peut-être envisagée pour les années 80-85.

Le réacteur à fusion industriel ne peut vraisemblablement pas être envisagé avant la fin de ce siècle (peut-être le début du précédent). Une fois la démonstration de principe faite il faudra résoudre les problèmes technologiques afin de produire industriellement de l'énergie. La résolution de ces problèmes nécessite des moyens scientifiques et industriels très importants mais, ceux-ci ne semble pas en dehors des possibilités des grands pays industriels de l'avenir, USA, URSS, Europe (en admettant qu'elle se fasse un jour). Il a fallu 25 ans pour que les réacteurs à fission (le premier ayant été construit par Fermi à Chicago en 1942) atteignent le stade industriel et produisent de l'énergie de façon fiable et sûre!

Encore faut-il remarquer que l'effort et l'environnement étaient propices. Il est peu probable que l'énergie de fusion soit disponible industriellement avant 15 à 20 ans.

VI.7 - INTERETS DE L'ENERGIE DE FUSION

Les avantages principaux de l'énergie de fusion sont les suivants :

- absence de production de résidus radioactifs (type produits de fission)

- combustible peu coûteux et très uniformément répartis sur la terre (le deutérium existe dans l'eau à la teneur de 1/5000),

- rendement énergétique supérieur à celui des autres sources d'énergie.

Les réaction de fusion se produisant à très hautes températures il est vraisemblable que le rendement d'un réacteur à fusion dépassera celui des réacteurs à fission (ceci dépendra des progrès technologiques qui auront été réalisés à cette époque). Cet accroissement de rendement a un double intérêt

- d'une part , il abaisse le cout de l'énergie produite
- d'autre part, il diminue considérablement les pollutions thermiques.

En ce qui concerne les inconvénients on citera la nécessité vraisemblable de construire de très grosses unités génératrice d'énergie électrique de l'ordre de 5 à 10 gigawatts; à notre époque, cet ordre de grandeur pose des problèmes divers (risques consécutifs à une disjonction de la centrale en ce qui concerne l'équilibre du réseau électrique, problèmes d'interconnection etc...) mais en supposant que l'énergie continue à se développer au rythme actuel, cet inconvénient n'en sera plus un à la fin de ce siècle.

Enfin signalons qu'il n'est pas exclu que les réacteurs à fusion puissent brûler les déchets radioactifs des réacteurs à fission.

La nécessité de construire de grosses unités productrice d'énergie va dans le sens d'une forte concentration des industries productrices des moyens à mettre en oeuvre.

C H A P I T R E V I I

CONCLUSIONS ET TENTATIVES DE PROSPECTIVES

CONCLUSIONS ET TENTATIVES DE PERSPECTIVES

Après avoir examiné le cycle de l'énergie dans l'univers et constaté que l'énergie s'y dégrade contrairement on a mis en évidence que l'apparition de l'énergie nucléaire constitue un événement important dans ce cycle (l'entropie de l'énergie d'origine nucléaire est beaucoup plus faible que celle de l'énergie fissile, charbon, pétrole).

Une très faible fraction de l'énergie reçue par la Terre a été emmagasinée au cours des millions d'années sous forme de matériaux combustibles fissiles (charbon, pétrole, gaz) ; les réserves sont encore importantes puisqu'en 1972 on a consommé dans l'ensemble du monde seulement la millième partie des réserves prouvées, mais elles concernent principalement le charbon ; pour le pétrole et le gaz la consommation mondiale 73 a représenter environ 3 %. On constate que la demande d'énergie mondiale croît au rythme de 5 % par an correspondant à ^{un} taux de doublement tous les 17 ans ; il est possible que cette croissance se ralentisse un peu à l'avenir dans les pays industrialisés mais il est également vraisemblable que la croissance d'autres pays maintiendra la demande énergétique mondiale à un haut niveau. La structure de la demande énergétique des pays industrialisés a été examinée, elle a mis en évidence que la technologie actuelle ne permet pas de récupérer sous une forme de travail utile plus de 50 % de l'énergie consommée, il apparaît même que ce chiffre caractérisant le rendement global de la production énergétique mondiale ait tendance à décroître.

L'industrie énergétique étant hautement capitalistique, les délais de mise en production étant relativement longs, (à 10 ans, les structures sociales n'évoluant que lentement il apparaît ainsi que le pétrole et surtout le charbon dont l'emploi sans doute réapparaîtra (mais sous forme de combustibles liquides ou gazeux) resteront à court terme (5 ans) et moyen terme (10 à 15 ans) notre source d'énergie dominante ; mais le coût de cette énergie continuera de s'élever (car les gisements sont de plus en plus difficiles à exploiter). Ces gisements (en particulier les gisements pétroliers) sont éloignés des centres de consommation et sous la dépendance soit de sociétés multinationales soit de pays peu industrialisés de sorte que l'Europe et le Japon sont et seront dans l'avenir dans une situation énergétique difficile. La production et l'utilisation de l'énergie fossile est polluante et elle est souvent remise en cause par une partie de la population ; il est certainement possible de trouver des solutions techniques pour réduire considérablement les risques de pollution consécutifs à la mise en oeuvre de centrales électriques consommant du pétrole ou du charbon (diminution des poussières émises, des gaz imbrulés etc...) par contre, les problèmes posés par la pollution thermique risquent d'être plus difficile à résoudre. Selon les spécialistes : l'environnement c'est vraisemblablement sous cette forme que risque d'apparaître la limite de l'extension de la production d'énergie terrestre pour satisfaire les demandes de notre société (production d'énergie par la société humaine égale à la quantité d'énergie reçue par la terre en provenance du soleil).

Ces éléments déterminent ce que l'on appelle "la crise de l'énergie" cette crise ne doit pas être confondue avec une pénurie d'énergie car en aucun cas il n'y a pénurie ; il y a par contre, prise de conscience des problèmes suivants.

- le coût du pétrole devient de plus en plus élevé , car les gisements les plus riches ont été exploités en premier et la demande est de plus en plus forte (le déficit pétrolier des États Unis ne semble pas pouvoir être rapidement résorbé), les pays producteurs se sont entendus pour relever le prix du pétrole qu'ils produisent. Les USA , pays exportateur de pétrole sont progressivement devenus le plus gros importateur.

- les autres sources d'énergie possibles (énergie thermique des mers, énergie marémotrice, énergie éolienne, énergie solaire, énergie géothermique , énergie de géopression) les piles à combustible etc..) ne sont pas en mesure de produire des quantités massives d'énergie, elles peuvent certes apporter des améliorations substantielles, mais elles ne peuvent, dans l'état actuel de la technique et dans celui prévisible à court et moyen terme, rivaliser efficacement avec les combustibles fossiles ou avec l'énergie nucléaire de fission ou de fusion.

Cette crise de l'énergie constitue un phénomène majeur qui apparaît sous des formes différentes dans les divers pays.

- Aux USA l'administration américaine a préparé un programme définissant les lignes principales de la politique énergétique américaine dans les 5 prochaines années, ce rapport est important à plus d'un titre :

d'une part, il est reconnu que la situation actuelle est dû à l'absence d'un programme national coordonné de recherches et de développement énergétiques, d'autre part il vise à permettre de retrouver à terme l'interdépendance énergétique de l'USA.

Enfin, l'importance des moyens consentis et la place que les USA continuent d'occuper dans le domaine risquent d'être déterminant pour l'évolution mondiale et pour celle de l'Europe en particulier.

Ce programme prévoit de dépenser 22,5 milliards de \$ en 5 ans (à partir de l'année fiscale 75) dont 10 milliards de \$ à la charge du gouvernement américain en vue de travaux de recherches et de développement concernant ; la réduction des pertes énergétiques des installations existants ou à créer, l'accroissement de la production américaine de pétrole et de charbon par l'emploi de nouvelles méthodes mettant en oeuvre une technologie plus efficace, la substitution du charbon (liquéfié ou gazéfié) au pétrole en développant des procédés industriels appropriés, la validation de l'option nucléaire actuelle et en particulier des réacteurs à neutrons rapides ; le développement de nouvelles sources d'énergie et en particulier la fusion thermonucléaire.

Il résulte de ce programme que les USA se lance dans l'énergie nucléaire sur une grande échelle, les sociétés pétrolières

ont déjà investi fortement dans ce domaine et ont tendance à accroître leur effort au détriment du pétrole dont la rentabilité est en décroissance. La filière retenue par les USA utilise de l'uranium faiblement enrichi et de l'eau soit pressurisée soit en ébullition : la société Westinghouse assure le développement de la formule PWR qui est dérivée des réacteurs de sous-marins, la société General Electric assure le développement de la formule BWR. Ces 2 sociétés se partagent à égalité le marché. Les centrales nucléaires américaines en fonctionnement ou en commandes représentent à fois la totalité de la puissance électrique installée en France. L'ampleur du marché américain et la puissance des sociétés Westinghouse et GE ont compté parmi les éléments ayant conduit l'Europe dont la France et se rallier à cette filière et à abandonner (faute de débouchés suffisants) la filière graphite gaz qui avait été développée. La filière américaine PWR utilise particulièrement mal l'uranium, et la quantité de vapeur produite par les centrales nucléaires de ce type ne permet pas de profiter des possibilités de la technologie moderne, en ce qui concerne la production électrique, cette filière a été conçue pour fonctionner dans un environnement particulièrement difficile (sous-marin). Une centaine de réacteurs à usages militaires ont été construits ce qui permet à cette filière d'offrir des garanties de fiabilité et de robustesse que la filière graphite gaz limitée au seul marché national français (et anglais) n'avait pu acquérir ; en outre le dynamisme, l'expérience industrielle et commerciale, la puissance, la richesse, les habitudes de gestion et la réputation internationale de sociétés telles que Westinghouse ont été des éléments déterminants dans cette évolution. Quant au réacteurs, bouillants BWR, conçus par

la général Electric s'beneficient de tous les atouts et du prestige de cette énorme société . Ces 2 Modèles B et PWR de cette filiale américaine ont conquis non seulement le marché intérieur américain mais également le marché européen puisque actuellement 3600 MWe ont été déjà commandés et qu'il était envisagé de commander 2400 MWe en 1985

30800 en Allemagne

22800 en France

18780 en Angleterre

16500 en Italie.

soit au total en fonctionnement vers 1985 124810 MWe.

Toutes les commandes en cours en Europe concernent des réacteurs de ce type. Si on adjoint le Japon, on peut dire que le monde entier (à part l'URSS, la Chine et les Pays de l'Est) ont adopté cette filière . L'URSS semble avoir des réserves de combustibles fossile bon marché qui lui évite de se lancer trop rapidement dans la voie nucléaire. La construction de ces centrales s'effectue sous licence américaine par les filiales des 2 sociétés W et GE; en France le groupe Framatome groupe Creuset Loire , Schneider construit les réacteurs PWR tandis que le groupe CGE construit les réacteurs BWR (qui viennent de faire leur apparition sur le marché européen).

Jusqu'à présent le monopole du combustible enrichi nécessaire au fonctionnement de ces réacteurs était concentré entre des mains américaines selon une technologie conçue pendant la dernière guerre ; il n'est certainement pas abusif de penser que sans les possibilités qu'offraient une économie de guerre il n'aurait pas

été possible de mettre au point et de construire des usines de séparation isotopique utilisant le procédé de diffusion gazeuse. Seuls les USA disposaient à l'époque des moyens humains scientifiques technologiques et financiers nécessaires à la mise au point de ce procédé particulièrement couteux en énergie. Les autres procédés possibles n'ont pas encore atteint le niveau technologique permettant de rivaliser avec des chances de succès certain avec la diffusion isotopique ; l'ultra centrifugation paraît sur le point de faire une percée technologique mais la démonstration industrielle reste à faire (elle est en cours).

Afin de disposer de sources de combustibles qui leur soient spécifiques les pays européens viennent de décider sous l'initiative de la France de construire une usine de séparation isotopique utilisant la diffusion gazeuse, la société Eurodef regroupe des intérêts français, Italiens, Belges, Espagnols, en parallèle une autre société européenne URENCO regroupant des intérêts allemands, anglais, et hollandais se lance dans la séparation isotopique par le procédé d'ultracentrifugation. On prévoit que pendant les dix premières années l'uranium enrichi sera surtout fourni par les usines de séparation isotopiques et qu'ensuite on pourra passer à l'ultracentrifugation qui sera moins couteuse en énergie. D'autres solutions sont éventuellement envisageables (lasers).

Ces usines ne seront pas opérationnelles avant 1980, les sommes d'argent investies à cette époque seront telles qu'il serait déraisonnable de ne pas continuer dans cette voie pendant 15 à 20 ans (durée de vie moyenne d'une installation industrielle).

de sorte que l'on peut dire que les options prises maintenant oriente l'avenir mondial et européen jusqu'à la fin du siècle.

En outre, cet avenir ne peut plus se concevoir dans le cadre étroit des pays européens ; ce sera vrai pour le combustible vierge mais ce le sera au moins autant pour le combustible enrichi car les usines de retraitement ne pourront être que multinationales.

Cet uranium enrichi servira également en temps utile à lancer d'autres filières parmi lesquelles les réacteurs à haute température ont de grandes chances de jouer un rôle important : l'instant d'apparition de ces réacteurs dépendra de l'évolution de la technologie, du coût des produits pétroliers, du développement de l'industrie chimique. Quand aux réacteurs à neutrons rapides des domaines dans lequel la France est pour l'instant fort bien placée, ils se développeront lorsque les stocks de Plutonium produit par les réacteurs à eau seront suffisamment importants. L'intérêt de ces réacteurs est indéniable ils sont les seuls à permettre une utilisation rationnelle de l'énergie nucléaire produite par l'uranium :

Les ressources mondiales connues en uranium sont suffisantes pour faire face aux besoins énergétiques prévisibles à très long terme ; le tableau de la page met en évidence cette possibilité. Les réacteurs à neutrons rapides produisant environ $6 \cdot 10^9$ KWh par tonne d'uranium. Les ressources mondiales en uranium permettent de produire $3 \cdot 10^6 \times 6 \cdot 10^9 = 2 \cdot 10^{16}$ KWh soit $5 \cdot 10^3$ milliards de TEC soit encore 200 fois la consommation

mondiale de l'an 2000 (estimée à 29 milliards de TCC (voir tableau p. 7)). On rappelle que le prix du combustible nucléaire ne représente qu'une très faible fraction du prix de l'énergie produite; comment dans ces conditions parler de pénurie d'énergie ? Il faudrait en outre inclure les possibilités du Thorium et les espoirs de la fusion thermonucléaire.

Ces espoirs sont sérieux car il y a de grandes chances si l'on désire (c'est à dire si les gouvernements y mettent des moyens suffisants) que la fusion puisse un jour produire de l'énergie à usage industriel. Les 2 reproches les plus sérieux adressés à l'énergie nucléaire de fission concerne

la production de résidus radioactifs et leur rendement énergétique comparable à celui des centrales à combustibles fossiles (tout au moins en ce qui concerne les réacteurs à neutrons thermiques).

Les réactions de fusion ne produisent pas des radioéléments directement, il est possible que les neutrons produits puissent activer les matériaux mais ce problème ne présente pas les mêmes caractères de gravité que les produits de fission eux-mêmes;

il n'est du reste pas exclu de penser qu'il soit possible de produire de l'énergie de fusion par l'intermédiaire de réactions non génératrices de neutrons donc ne générant aucune substance radioactive. Quand au risque de pollution thermique les températures auxquelles se produisent les réactions thermonucléaires laissent supposer que les rendements pourront être considérablement augmentés.

Quelles sont les échéances possibles. Là encore le rôle des USA est déterminant, les moyens actuellement consentis n'assent espérer une démonstration de principe dans les 3 à 5 ans à venir et la réalisation des premiers réacteurs à fusion pour le début du siècle prochain ; la fusion ne nécessitant que la mise en oeuvre de Deutérium, les ressources mondiales en eau et les faibles consommations spécifiques permettent de dire aujourd'hui que les besoins énergétiques prévisibles de l'humanité seront satisfaits quels qu'ils puissent raisonnablement être (on rappelle que 1 m³ d'eau de mer contient du deutérium permettant de produire une énergie équivalente à la combustion de 300 tonnes de charbon) En admettant que l'on puisse abaisser de 1 pour cent la teneur en deutérium des eaux des océans, passant ainsi de $2 \cdot 10^{-4}$ à $1,98 \cdot 10^{-4}$, cette réserve d'énergie équivaut 500 000 fois les réserves énergétiques du monde. Il n'y a donc en aucune façon pénurie d'énergie. On peut même dire que pour la première fois dans son histoire, l'humanité a l'assurance de son approvisionnement pour un très long terme (qui risque peut-être même de dépasser son existence). Mais s'il n'y a pas pénurie à long terme il y a crise à court terme. Celle-ci ne tient qu'à l'insuffisante organisation de la société humaine.

Dès aujourd'hui il apparaît qu'il serait plus raisonnable de conserver les combustibles fossiles pour des besoins spécifiques (petrochimie, transport aériens, fabrication alimentaire etc..) et d'utiliser les combustibles fissiles ou (fusibles quand on le pourra) pour la production d'énergie. Ces changements ne peuvent se faire très rapidement, les structures sociales, mentales, industrielles, n'évoluent que lentement.

En ce qui concerne les aspects économiques, les points suivants paraissent importants à retenir.

1) Le règne du nucléaire conduira vraisemblablement à une concentration industrielle de plus en plus grande. Dès maintenant 2 sociétés américaines ou leur filiale W et GE se partagent le marché mondial de la construction des centrales nucléaires. L'industrie privée américaine se prépare à se lancer dans le cycle du combustible; en ce qui concerne la séparation isotopique rien ne presse aux USA, jusqu'à présent elle est entre les mains du gouvernement mais celui ci souhaite la faire passer en main privée. 2 groupes sont en présence l'un Westinghouse Union Carbide Bechtel, l'autre General Electric, ils ne semblent, ni l'un ni l'autre très pressés de se décider, tout se passe comme si l'on attendait que les résultats de l'ultracentrifugation ou de la séparation isotopique par laser donnent des résultats satisfaisants afin d'éviter le recours à la coûteuse diffusion gazeuse. On voit ainsi apparaître une concentration verticale importante (que confirme la récente décision de la GE de construire une usine de retraitement de combustibles irradiés) et la décision de Westinghouse de se lancer dans la fabrication de combustible au plutonium).

2) Cette concentration industrielle est favorisée par l'énormité des investissements à entreprendre pour atteindre l'objectif envisagé aux USA vers la fin de ce siècle, il faut d'après l'US EC investir aux USA environ 700 millions de \$ d'ici la fin du siècle. Il n'est donc pas étonnant que les sociétés pétrolières qui ont accumulé d'énormes richesses viennent se joindre aux groupe-

ments industriels tels que W et GE. Il ne semble pas que l'on puisse compter sur une part d'autofinancement excédant 25 %, ce qui conduit à envisager des hausses de prix de l'énergie pour y attirer les investisseurs pétroliers (on envisage aux USA une hausse du courant électrique de 35 % à relativement court terme).

Cette concentration industrielle a débordé le cadre américain et dès maintenant l'Europe Occidentale y est incluse (tout au moins en ce qui concerne la construction des centrales); pour la séparation isotopique le problème se posera en termes différents car si l'Europe et la France en particulier peuvent espérer disposer en lançant la construction d'une grande usine de séparation isotopique par diffusion gazeuse d'une certaine indépendance d'approvisionnement on peut s'interroger sur le prix de cette indépendance. A une époque de renchérissement du coût de l'énergie le choix de la méthode la plus coûteuse en énergie pour séparer l'uranium est un risque certain.

3) Comment dégager, en France en particulier, les sommes d'argent permettant de faire face aux énormes investissements nécessaires. Après la récente accélération du programme nucléaire consécutif à la crise pétrolière l'EDF envisage d'investir 20 milliards de francs dans les 5 prochaines années pour faire face aux objectifs du programme envisagé. La situation française en ce qui concerne l'énergie est relativement mauvaise par rapport à nos principaux partenaires européens. L'Angleterre fonde des espoirs sérieux sur les gisements de gaz de la mer du Nord, l'Allemagne dispose de ressources charbonnières importantes, la France, l'Italie et l'Espagne sont

très pauvres en énergie fossile, leur seul espoir concerne le nucléaire. L'industrie française arrivera-t-elle à satisfaire les commandes en cours ; 13 centrales de 1000 MWE sont prévues en 1974-1975, l'un des problèmes rencontrés, concerne la construction des cuves de réacteurs sous pression; le groupe Framatome vient de décider de porter la capacité de production de ces cuves à 8 par ans, l'industrie française n'a pas d'expérience dans ce domaine car elle n'a jamais construit de centrale de ce genre, on ne saurait donc se dissimuler qu'en optant si résolument pour un programme nucléaire de cette ampleur sur ce type de filière l'EDF a pris un risque important car aucune installation de ce genre ne fonctionne encore en France. On ne peut s'empêcher de regretter que les commandes de centrales nucléaires, aient été aussi peu nombreuses en France lors des dernières années ; un arrêt progressif de la filière graphite gaz n'eut-il pas été préférable à la décision brutale qui a été prise ? mais ceci est un autre sujet à verser au dossier des relations EDF CEA, (il montre aussi que la rivalité entre 2 organismes étatiques peut être au moins aussi violente que celle pouvant exister dans le secteur privé). En tout cas le risque qu'a pris l'EDF est comme le dit Nicolas Vichney, à sa taille.

4) D'un point de vue économique , on voit mal quels critères adopter pour effectuer les investissements envisagés ; que faire du parc de centrales actuelles au fuel qui sera loin d'être amorti en 1980 ou 1982 ? Quel taux d'actualisation choisir pour effectuer des investissements aussi importants et portant sur des périodes de temps si longues .

Comment l'EDF va-t-elle trouver les sommes d'argent nécessaires ? Cette entreprise nationale avait pu maintenir un taux d'autofinancement relativement élevé de 60 à 70 % jusqu'en 1972.

La situation ne va plus être désormais la même, le gouvernement vient d'autoriser l'EDF à emprunter sur le marché international ; il est vraisemblable que tous les pays européens (à part peut-être l'Allemagne) vont devoir en faire autant, compte tenu des besoins américains 700 milliards de \$ c'est environ 1000 milliards dont le monde occidental va avoir besoin dans les 20 prochaines années. Ainsi se trouve reposer le problème de l'équilibre des balances des paiements des USA et de l'Europe, celui de l'emploi des capitaux arabes, du développement de pays non industrialisés du prix des matières premières. Jusqu'à maintenant les états industrialisés payaient leurs importations de matières premières et en particulier de combustible fossiles en produits agricoles et manufacturés. A quelques pour cent près les 2 montants s'équilibraient (on pourrait également dire que le prix des matières premières était déterminé pour que cet équilibre se maintienne sensiblement). La crise pétrolière vient de bouleverser cette situation, un nouvel équilibre se prépare, l'énergie nucléaire peut techniquement résoudre les problèmes qui se posent mais l'importance des investissements contraindra à faire des choix au détriment d'autres domaines et les critères de ces choix n'apparaissent pas clairement. Les comportements de la société face à ces choix devraient largement être pris en compte.

Il apparaît ainsi que la crise pétrolière actuelle n'est pas un épiphénomène, c'est l'amorce de profondes modifications concernant nos structures économiques sociales et industrielles, dès maintenant les USA se sont engagés en grand dans la production d'énergie nucléaire par fission pour suppléer à la pénurie de pétrole ; ils ont entraîné dans leur sillage technologique l'Europe occidentale qui a adopté (après quelques essais d'indépendance) la technologie américaine ; compte tenu des échéances, les décisions prises dans ce domaine énergétique engagent dès maintenant l'avenir européen jusqu'à la fin de ce siècle, au-delà il est probable que la fusion nucléaire sera industriellement au point de sorte que le problème énergétique se posera dans les termes complètement différents, la géopolitique aura en particulier totalement disparu.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - Scientific American, Septembre 1971, Volume 24, Number
- 2 - Rapport groupé interministériel d'évaluation de l'environnement dec. 73
- 3 - Comité professionnel du pétrole, élément statistique 1973.
- 4 - Commissariat General au Plan. Plan et Prospectives
- 5 - Ce monde affamé d'énergie. Michel Grenoir, R. LAFFONT.
- 6 - Le nouvel enjeu pétrolier. Jean Marie Chevalier, Calmann Levy.
- 7 - Document sur l'Energie distribué par le Ministère du développement industriel et scientifique.
- 8 - Annales des mines. Janvier 1974. D. BRETON.
- 9 - Annales des mines. Janvier 1974. Les déchets radioactifs Suisse'ier.
- 10 - Rapport de la commission consultative pour la production d'électricité d'origine nucléaire, Ministère du Développement industriel et scientifique. Novembre 1970 et Avril 1973.
- 11 - Physics to day. December 1973. Energy crisis in perspective.

- 12 - Une crise porteuse d'énergie Robert Lattès / Le Monde 2.2.74
- 13 - Le pari Nucléaire, Nicolas Vichney, Le Monde 13.3.74
- 14 - Il n'y a pas de pénurie générale de l'énergie . A. Déjou,
Le Monde 18.12.74
- 15 - Energie Nucléaire et civilisation. Congrès de Liège 73.
- 16 - Energie .environnement . Pollution . D. Breton et D. Dollone,
Faculté Assas 1973.
- 17 - Rapport énergie environnement, 1972. Documentation Française.
- 18 - Rapport énergie environnement, 1972. Documentation française.
- 19 - Rapport de préparation du 6ème Plan. Charbon Petrole Gaz
Energie . (Documentation Française)
- 20 - Rapport sur l'énergie M'ITRE Octobre 1972.
- 21 - Les centrales Nucléaires.Cours de l'INSTN.
- 22 - L'exploitation rationnelle du Tiers Monde. Le monde Diplomatique, 2 Fev. 1974. Christian Goux.
- 23 - Table ronde sur l'énergie; colloque sur l'énergie . Paris
Dec. 1973.

- 24 - Le Péril Américain, C. GOUX , J.F. Landeau,
Calmann-Lévy.
- 25 - Maitriser le futur Allen Michel 1973.
- 26 - L'Energie et environnement . La documentation française
- 27 - The Nation's Energy Future. A report to R. N. Reagan,
Président of the United States. Sec. 71, Nat. 1973.
- 28 - Reflexions sur un éventuel reacteur thermonucléaire.
Rapport CEA IST 71 - 46. Nov. 1971. P. Breton.
- 29 - Annales des Mines. Vues prospectives sur l'énergie nucléaire
de fission et de fusion , considération sur les risques asso-
ciés Janvier 1974. D. Breton.
- 30 - Production d'Uranium Enrichi en Europe , C/ Leduc et M. Mezin.
Sciences et Techniques Janvier 1974.
- 31 - Revue Française de l'Energie Oct. Nov. 1973.
- 32 - L'an 2000. Herman Kahn Anthony Wiener, Marabout
- 33 - The limits to growth Club de Rome Potomac Associate. Book.

