

# SÉNAT

1<sup>re</sup> SESSION ORDINAIRE DE 1959-1960

---

Annexe au procès-verbal de la séance du 12 novembre 1959.

## RAPPORT D'INFORMATION

FAIT

*au nom de la Commission des Finances, du Contrôle budgétaire  
et des Comptes économiques de la Nation (1) sur l'Energie  
atomique.*

Par M. Jean-Eric BOUSCH

Sénateur.

---

---

(1) Cette commission est composée de : MM. Alex Roubert, président ; Jacques Masteau, Gustave Alric, Jean-Eric Bousch, vice-présidents ; Yvon Coudé du Foresto, Hector Peschaud, Julien Brunhes, secrétaires ; Marcel Pellenc, rapporteur général ; André Armengaud, Fernand Auberger, Paul Chevallier, Bernard Chochoy, André Colin, Antoine Courrière, Marc Desaché, Jacques Descours-Desacres, Paul Driant, Jacques Duclos, Pierre Garet, Michel Kistler, Roger Lachèvre, Jean-Marie Louvel, Fernand Malé, André Maroselli, Georges Marrane, Max Monichon, René Montaldo, Geoffroy de Montalembert, Guy Petit, Georges Portmann, Mlle Irma Rapuzzi, MM. Joseph Raybaud, Jacques Richard, Jacques Soufflet, Ludovic Tron.

## SOMMAIRE

---

	Pages.
INTRODUCTION .....	5
<b>1<sup>re</sup> PARTIE. — Rappel des notions introductives à l'étude du problème de l'énergie atomique.....</b>	<b>6</b>
I. — Rappel des principales données physiques.....	6
II. — Problèmes posés par la technique de la production.....	9
<b>2<sup>e</sup> PARTIE. — Les réacteurs nucléaires : description et principales réalisations dans les deux grands pays producteurs d'énergie atomique, U. S. A. et Grande-Bretagne.....</b>	<b>15</b>
I. — Les réacteurs nucléaires.....	15
II. — Les réalisations américaines.....	20
III. — Programme anglais.....	22
<b>3<sup>e</sup> PARTIE. — Le programme atomique français.....</b>	<b>24</b>
I. — Les réalisations françaises : principales piles en service.....	24
II. — Le nouveau programme atomique français : 1957-1961.....	25
III. — Les centrales de puissance de l'E. D. F. et autres réalisations atomiques françaises .....	27
<b>4<sup>e</sup> PARTIE. — Place de l'énergie atomique dans l'économie moderne : intérêt d'un programme atomique.....</b>	<b>29</b>
I. — Les besoins énergétiques de l'Europe occidentale.....	29
II. — Les perspectives économiques de l'énergie atomique : le prix de revient .....	32
III. — Intérêt d'un programme d'énergie nucléaire.....	34
1° Le programme atomique est nécessaire pour faire face aux besoins futurs en énergie.....	34
2° Le programme atomique doit tenir compte des efforts consentis par les autres nations et les possibilités financières du pays.....	35
3° Le programme atomique minimum de la France.....	37
CONCLUSION .....	39

---

## Introduction.

Mesdames, Messieurs,

L'Énergie atomique est un sujet si vaste qu'il n'est pas très facile d'en donner un aperçu dans un rapport aussi court que celui que nous avons l'honneur de vous présenter.

Nous avons donc dû laisser volontairement de côté certains aspects des plus intéressants de la question, pour nous limiter aux problèmes essentiels de l'aspect « énergétique » de l'atome et de sa compréhension.

L'étude qui vous est soumise comporte quatre parties.

Dans une première partie, nous avons rappelé les principales données physiques et les problèmes techniques qui sont posés par la production d'énergie atomique.

Dans une deuxième partie, nous avons traité des réacteurs nucléaires, en donnant la description et essayé de relater, de façon incomplète certes, les réalisations des deux principaux pays de l'Alliance Atlantique ayant une industrie atomique : les U. S. A. et la Grande-Bretagne.

La troisième partie est relative au programme atomique français.

Ces trois parties, tout en étant d'un intérêt indispensable pour la compréhension du sujet, peuvent être négligées dans une première étude par le lecteur pressé et déjà au fait du problème.

La quatrième partie, par contre, traite de la place de l'Énergie atomique dans l'économie moderne.

Après un rappel des besoins énergétiques de l'Europe occidentale, nous avons évoqué le problème du prix de revient et exposé l'intérêt d'un programme atomique national.

Ceux qui voudront se pencher sur ces pages constateront que la France ne peut pas rester à l'écart de la compétition internationale dans une matière susceptible de provoquer une nouvelle « révolution industrielle ».

Pour l'aviation à réaction d'usage commercial, grâce à la Caravelle, nous étions prêts au bon moment ; de même, la France pourra entrer en temps opportun dans la compétition sans précédent qui s'annonce, à condition de continuer à donner à nos chercheurs les moyens indispensables à la poursuite des études engagées.

Bien entendu, nos conclusions tiennent compte du fait nouveau des découvertes sahariennes — qui nous donnent un répit — nous évitant des réalisations industrielles en série, de toute manière dépassées dès leur mise en route, et, pour l'avenir, d'un intérêt disproportionné avec les sacrifices financiers qu'elles entraîneraient.

## PREMIERE PARTIE

### RAPPEL DES NOTIONS INTRODUCTIVES A L'ETUDE DU PROBLEME DE L'ENERGIE ATOMIQUE

#### I. — Rappel des principales données physiques.

1° Les programmes atomiques actuels sont établis sur l'utilisation du phénomène de la *fission*. La fission est la transmutation de noyaux d'*atomes lourds* en deux noyaux de masse sensiblement égale (si la fission désigne un phénomène pouvant s'appliquer à tous les atomes, seule la fission d'atomes lourds est susceptible d'applications énergétiques).

Le phénomène de la fission peut avoir lieu spontanément (fission naturelle, très rare, car ne subsistent depuis l'origine des temps que les corps évoluant très lentement), ou peut être provoqué par le bombardement de neutrons, résultant eux-mêmes d'une réaction nucléaire.

La fission s'accompagne d'une forte libération d'énergie (sous forme d'énergie cinétique des diverses particules produites, notamment des deux noyaux, et sous forme de rayonnement électromagnétique). De plus, elle libère précisément des neutrons (deux à trois) qui peuvent être utilisés à entretenir ou développer une véritable réaction en chaîne. Ces deux caractéristiques, forte libération d'énergie par atome fissionné et surtout possibilité de développer une réaction en chaîne, sont à la base du développement actuel de l'énergie atomique.

2° Pour qu'une réaction en chaîne puisse se développer, il faut toutefois ne pas perdre trop de neutrons, de telle manière qu'à 1 neutron provoquant la fission d'un noyau corresponde au moins parmi les neutrons produits, 1 neutron utile, c'est-à-dire arrivant à provoquer à son tour la fission d'un autre noyau. Si donc la réaction libère, statistiquement, 2,5 neutrons, on ne peut perdre au maximum que 1,5 neutron. Or, quand on prend une certaine masse de matière fissile, les *pertes de neutrons* sont de deux sortes :

les pertes dues aux neutrons qui sortent de la masse (pertes par surface) et les pertes dues aux neutrons qui sont absorbés, soit par des impuretés, soit par les atomes mêmes de la matière fissile, en donnant lieu à d'autres types de réaction (absorption) : le comportement d'un noyau donné en face d'un neutron incident peut donner lieu, en effet, à plusieurs types de réactions ayant des chances respectives bien déterminées, soit la fission, soit l'absorption.

3° Parmi tous les *corps naturels* susceptibles de subir la fission dans les conditions exposées ci-dessus, il n'en existe qu'un qui puisse donner lieu à une réaction en chaîne, c'est-à-dire dont on puisse trouver un certain volume (taille critique) à partir duquel les pertes de neutrons par surface et par absorption soient suffisamment faibles : c'est l'isotope 235 de l'uranium. Cet isotope existe à raison de 0,7 % dans l'uranium naturel, qui comporte par ailleurs 99,3 % de l'isotope 238.

4° L'isotope 238 est bien, lui aussi, fissile, mais il réagit plutôt par absorption que par fission devant les neutrons. Il ne peut donc pas être le siège de réactions en chaîne et joue, au contraire, le rôle d'absorbant. Néanmoins, le bilan neutronique pour l'isotope 235 est suffisamment favorable pour que, malgré la gêne apportée par l'isotope 238, on puisse arriver à maintenir une réaction en chaîne dans de l'uranium naturel. Mais c'est beaucoup plus délicat qu'avec de l'uranium 235 pur : il faut s'arranger pour que les neutrons aient le plus de chances possible de provoquer la fission (les chances pour qu'une réaction de fission ou d'absorption ait lieu avec un noyau déterminé varient, en effet, avec l'énergie du neutron incident). Le cas se produit lorsque des neutrons ont une faible vitesse. Or, les neutrons issus de la réaction de fission sont très rapides. Il faut donc les ralentir. On utilise pour cela des « *modérateurs* » constitués d'atomes légers, réagissant le moins possible avec les neutrons mais brisant leur vitesse par des chocs élastiques successifs. Les principaux modérateurs utilisables avec l'uranium naturel sont l'eau lourde, le beryllium et le graphite.

5° L'isotope 238 présent dans l'uranium naturel rend donc difficile une réaction en chaîne. Toutefois, il n'absorbe pas les neutrons inutilement, car il se transforme alors en *plutonium 239*. En réalisant une réaction en chaîne en présence d'uranium 238, on fabrique donc une matière fissile qui participe à son tour à la réaction. C'est pour cela qu'un réacteur à uranium naturel voit sa « réactivité » s'améliorer au bout d'un certain temps. Toutefois,

cela ne dure pas, car les noyaux des produits de la fission se comportent comme des poisons très avides de neutrons et finissent par étouffer la réaction.

6° Il existe dans la nature un autre corps que l'uranium 238, capable d'absorber les neutrons d'une réaction nucléaire pour donner une matière fissile : c'est le *thorium 232*. On obtient alors l'*uranium 233*, présentant les mêmes qualités que l'uranium 235 et le plutonium.

7° En résumé :

— il existe dans la nature une seule matière dite fissile, l'uranium 235, malheureusement diluée dans l'uranium 238, ce qui nécessite l'emploi d'un modérateur si l'on veut faire « diverger » une pile à uranium naturel ;

— l'uranium 238 n'est pas inutile, car, mêlé à une réaction nucléaire, il donne du plutonium, matière fissile artificielle ;

— le thorium se comporte comme l'uranium 238 et donne l'uranium 233, troisième matière fissile utilisable ;

— l'uranium 235, le plutonium et l'uranium 233 sont les trois seules matières, naturelles ou artificielles, dites « fissiles », c'est-à-dire utilisables pour développer une réaction en chaîne produisant de l'énergie ;

— l'uranium naturel et le thorium 232 sont les deux seules matières premières naturelles de l'énergie atomique. L'une est un mélange de matière fissile (uranium 235) et de matière « fertile » (uranium 238), c'est-à-dire susceptible de se transformer en matière fissile. L'autre est seulement une matière fertile.

## II. — Problèmes posés par la technique de production d'énergie nucléaire.

Les phénomènes physiques de base étant ainsi connus, le problème consiste à trouver un ensemble de machines qui utilise des matières premières existant en quantité suffisante dans la nature et qui conduise à un prix de revient de l'énergie produite compétitif.

En fait, la croûte terrestre recèle des quantités considérables de tous les éléments naturels connus. Leur dissémination rend seulement leur extraction plus ou moins coûteuse. Finalement, l'ensemble du problème est d'ordre technico-économique.

A. — *Les voies possibles.*

1° Plus on s'éloigne de la science vers la technique, plus les résultats acquis perdent un certain aspect de permanence. C'est ce qui rend une classification des « techniques » nucléaires difficile et éphémère.

Nous distinguerons cependant les « voies » de l'énergie nucléaire, reposant sur des critères très généraux, et les « filières », reposant sur des critères plutôt techniques. Les voies ont donc un caractère plus permanent. Les filières sont en grand nombre, évoluent et se diversifient ; elles peuvent seulement être groupées en diverses catégories ;

2° Nous avons vu qu'en moyenne la fission d'un atome s'accompagnait d'environ 2,5 neutrons. Nous avons vu également qu'il ne fallait pas perdre, par fuite ou absorption, plus de 1,5 atome si on veut obtenir une réaction en chaîne et que l'absorption par de l'uranium 238 ou du thorium d'une partie de ces neutrons n'était pas inutile puisque produisant du plutonium 239 ou de l'uranium 233, fissiles.

Deux cas peuvent alors se produire, avec des conséquences très différentes, suivant que, sur 1,5 atome perdu, il y en a nettement plus d'un ou nettement moins d'un qui donne de la matière fissile, par absorption dans de la matière fertile.

Supposons en effet que nous disposions d'une quantité illimitée de matière fertile et que le « *taux de conversion* », c'est-à-dire précisément le nombre de neutrons absorbés utilement à la suite d'une fission, soit inférieur à 1, égal à 0,8 par exemple. Dans ce cas, l'atome initial de matière fissile engendrera 0,8 atome de matière fissile que l'on peut à son tour utiliser et qui donnera :  $0,8 \times 0,8 = 0,64$  atome fissile, et ainsi de suite.

Ce nombre devient de plus en plus petit et, au total, 1 atome fissile initial aura engendré dans notre exemple :  $0,8 + 0,64 + \dots = 4$  atomes fissiles issus de 4 atomes fertiles. Donc, quoi que l'on fasse, 1 atome d'uranium 235, la seule matière fissile naturelle, ne permet dans ce cas d'utiliser que 4 atomes d'uranium 238 ou de thorium, que nous avons pourtant supposés disponibles en quantités illimitées.

Supposons maintenant que le taux de conversion soit égal ou supérieur à 1. Chaque fois, on produit alors plus de matière fissile qu'on n'en consomme : il est possible de brûler, à partir de 1 atome de matière fissile une quantité illimitée de matière fertile ;

3° Le taux de conversion dépend des caractéristiques techniques du réacteur, sans pouvoir dépasser une limite théorique donnée par des considérations scientifiques. On voit son importance puisque la quantité d'uranium 235 disponible dans la nature peut ou non permettre suivant le cas l'utilisation d'une quantité 140 fois égale d'uranium 238 extrait simultanément (99,3 % de l'uranium naturel) et de tout le thorium.

Cela permet de distinguer, très schématiquement trois voies découlant du rôle prépondérant que peuvent y occuper chacune des trois matières fissiles :

#### *Voie de l'uranium 235.*

Lorsque le taux de conversion est nettement inférieur à 1, la réutilisation du plutonium 239 ou de l'uranium 233 que l'on peut produire est, si l'on peut dire, accessoire, et de toute façon, *il faut approvisionner les réacteurs en uranium 235 frais*. Cela est bien entendu indépendant du fait que le réacteur nécessite de l'uranium naturel ou au contraire de l'uranium préalablement enrichi dans une usine de séparation isotopique.

#### *Voie du plutonium.*

Lorsque le taux de conversion est supérieur à 1 et que la matière fertile utilisée est l'uranium 238, la matière fissile essentielle, une fois l'amorçage fait par l'uranium 235, est dans ce cas le plutonium.

#### *Voie de l'uranium 233.*

C'est une voie analogue à la précédente dans laquelle la matière fertile est le thorium et la matière fissile essentielle, l'uranium 233, une fois l'amorçage réalisé par ailleurs.

4° Du point de vue des *ressources en combustible*, ces trois voies ouvrent des possibilités très différentes.

Mais dans la mesure où l'uranium naturel est disponible en grandes quantités et à un prix abordable, le choix entre ces voies dépendra uniquement des prix de revient des techniques qui en dérivent.

A noter que la maîtrise technologique du plutonium, indispensable évidemment dans la voie du plutonium, s'impose également dans le cas de la voie de l'uranium 235, puisque, dans ce cas, l'uranium 235 étant généralement mêlé à de l'uranium 238 à des teneurs plus ou moins élevées, du plutonium est nécessairement produit, non en quantité illimitée, mais en tout cas en quantités appréciables.

B. — *Les diverses catégories de filières possibles.*

1° Les conditions dans lesquelles se déroule la réaction en chaîne sont essentielles.

Le rôle du réacteur nucléaire est donc déterminant dans la production d'énergie nucléaire. Il n'en reste pas moins que c'est l'ensemble des installations permettant la transformation en énergie de l'uranium ou du thorium, depuis la mine jusqu'au kWh, qui doit être pris en compte. C'est ce que nous appelons une *filière*. Le nombre en est grand puisque, à chaque variante technique de la chaîne d'installation précédente, peut correspondre une filière.

2° Les filières peuvent cependant être groupées en deux catégories suivant les conditions dans lesquelles se passe la réaction nucléaire.

Nous avons vu que pour faire diverger une pile à uranium naturel, il fallait ralentir les neutrons rapides, issus de la fission. Au contraire, une pile comportant un combustible suffisamment enrichi en matière fissile peut diverger sans que l'on ait besoin de ralentir les neutrons. Le fait d'utiliser des neutrons soit ralentis, soit rapides, va introduire des différences de technique assez sensibles tenant essentiellement aux deux faits suivants :

— les *réacteurs à neutrons lents* devront comporter un corps modérateur et utiliser des matériaux peu absorbants vis-à-vis de ces neutrons lents ;

— les *réacteurs à neutrons rapides* devront éviter, au contraire, les corps légers jouant le rôle de modérateur et devront utiliser des matériaux résistant bien à l'action destructrice des neutrons rapides, plus violente que celle des neutrons lents. Le contrôle et le pilotage de ces réacteurs posent également des problèmes différents.

Suivant que l'on fera appel à l'un ou à l'autre de ces types de réacteurs, on aura donc deux catégories de filières, de principe assez différent.

3° Nous avons vu qu'un réacteur pouvait avoir un taux de conversion inférieur ou supérieur à 1, fonction de sa structure et des caractéristiques nucléaires de ses éléments constitutifs. On démontre les résultats importants suivants :

— les réacteurs à *neutrons lents* et fonctionnant avec de l'*uranium naturel ou enrichi*, ou plus précisément avec de l'*uranium 238* comme matière fertile, ne peuvent pas avoir un taux de conversion égal ou supérieur à 1 ;

— les réacteurs à *neutrons lents* et fonctionnant avec du *thorium* comme matière fertile peuvent avoir un taux de conversion supérieur à 1 ;

— les réacteurs à *neutrons rapides*, à uranium ou thorium, peuvent avoir un taux de conversion supérieur à 1.

Cela montre, en particulier, que les réacteurs à *uranium naturel* (donc *nécessairement* à neutrons thermiques) ne peuvent pas avoir un taux de conversion égal à 1. Ils ne peuvent donc brûler que de l'ordre de 1 % de l'*uranium naturel*. Il en est de même des réacteurs à uranium enrichi et à neutrons thermiques (1) (mais l'utilisation de neutrons thermiques n'est plus une condition nécessaire).

Les réacteurs à neutrons *rapides* ne comportant pas de modérateur, donc utilisant nécessairement un combustible riche en matière fissile (uranium enrichi en uranium 235 dans une usine de séparation isotopique, plutonium, uranium 233), permettent au contraire d'obtenir un taux de conversion supérieur à 1. On peut avoir dans ce cas des piles dites « *surrégénératrices* » pouvant, compte tenu des pertes, brûler en fin de compte peut-être 40 à 50 % de l'*uranium naturel*.

Le thorium est favorable dans tous les cas, mais il nécessite la disposition d'une matière fissile au démarrage.

---

(1) Nous avons vu que les modérateurs utilisables avec l'*uranium naturel* étaient l'eau lourde, le béryllium (et son oxyde) et le graphite. Avec de l'*uranium enrichi*, on peut tolérer des modérateurs plus absorbants vis-à-vis des neutrons comme l'eau ordinaire ou des composés organiques.

4° En résumé, nous voyons que :

— les réacteurs à *neutrons lents* et fonctionnant soit avec de l'uranium naturel, soit avec de l'uranium enrichi fournissent les filières de la *voie de l'uranium 235* ;

— les réacteurs à *neutrons rapides* et fonctionnant avec de l'uranium 238 comme matière fertile fournissent, avec démarrage avec de l'uranium enrichi ou avec du plutonium déjà produit dans les filières précédentes, les filières de la *voie du plutonium* ;

— les réacteurs à *neutrons lents* ou rapides et fonctionnant avec du thorium comme matière fertile peuvent fournir, après démarrage avec de l'uranium enrichi ou avec du plutonium déjà produit dans les filières précédentes, les filières de la *voie du thorium*.

## DEUXIEME PARTIE

### LES REACTEURS NUCLEAIRES : DESCRIPTION ET PRINCIPALES REALISATIONS DANS LES DEUX GRANDS PAYS PRODUCTEURS D'ENERGIE ATOMIQUE

#### I. — Les réacteurs nucléaires.

On n'envisage pas actuellement de transformer l'énergie de fission en électricité autrement qu'en utilisant le cercle thermodynamique habituel au moyen de la vapeur se détendant dans une turbine et entraînant un alternateur.

Un réacteur nucléaire se compose donc d'une enceinte où se produit la réaction de fission et dont on extrait la chaleur par un fluide caloporteur qui peut être, soit un liquide, soit un gaz. Ce liquide ou ce gaz, devenant radioactif du fait qu'il passe dans le réacteur, la chaleur doit être transmise à de la vapeur d'eau au moyen d'un échangeur et c'est cette vapeur d'eau qui est ensuite détendue dans une turbine. Une centrale nucléaire se compose donc d'un réacteur proprement dit, d'un échangeur de chaleur et d'une turbine et d'un alternateur classique.

Nous allons décrire sommairement maintenant les deux principaux types de réacteurs développés industriellement, c'est-à-dire les réacteurs au graphite, à l'uranium naturel, refroidis par du gaz carbonique, d'une part, et les réacteurs à eau ordinaire, uranium enrichi, d'autre part, ces derniers supposant évidemment des usines de séparation isotopiques pour enrichir l'uranium.

#### 1. LES CENTRALES A URANIUM NATUREL-GRAPHITE REFROIDIES AU GAZ

##### a) *Le Réacteur.*

Nous avons déjà expliqué que pour que la réaction de fission en chaîne puisse avoir lieu, il faut que l'uranium soit mêlé à un modérateur qui est ici le graphite. Le mélange n'est pas homogène, mais il est réalisé par une masse de graphite pouvant atteindre des dimensions assez grandes (de l'ordre de 5 à 10 mètres et plus en hauteur et en diamètre), et percé d'un assez grand nombre de canaux (de l'ordre du millier), dont le diamètre est de 7 à 10 centimètres et

dans lesquels sont placées les barres d'uranium. Ces barres ont un diamètre de 2 à 3 centimètres et sont enveloppées d'une gaine au magnésium munie d'ailettes et dont le rôle est, d'une part, de faciliter les échanges de chaleur et, d'autre part, de protéger l'uranium et d'éviter que les produits de fission se répandent dans le réacteur. Le refroidissement, ou plus exactement l'évacuation de la chaleur, se fait par un courant de gaz carbonique qui passe dans l'intervalle laissé entre le barreau d'uranium et la paroi du canal de graphite. Pour que le rendement du réacteur soit satisfaisant, c'est-à-dire qu'il ait une puissance suffisante au mètre cube, il est nécessaire d'utiliser un courant de gaz carbonique sous une pression élevée, de façon que la masse de gaz carbonique qui passe en une seconde à travers un canal soit la plus grande possible, sans exiger une puissance de soufflage excessive.

L'ensemble du réacteur est entouré d'une protection biologique de façon que les rayonnements n'aillent pas à l'extérieur. Cette protection est constituée par des murs en béton et des parois d'eau éventuellement.

Le pilotage du réacteur se fait par des barres absorbantes qui plongent dans le graphite et qui, si on les abaisse, empoisonnent et arrêtent la réaction de fission.

Le réacteur conçu de cette façon va poser des problèmes techniques qui sont actuellement les suivants (nous n'examinerons que les principaux, car il y en a bien d'autres) :

— étant donné, d'une part, la taille que nous avons déjà évoquée pour le réacteur et qui est assez grande, il faudra une enceinte en acier assez vaste. Comme cette enceinte devra supporter une pression assez élevée de gaz carbonique, à une température qui pourra atteindre 400 ou 500°, on a des problèmes techniques difficiles qu'on avait rarement eu à résoudre jusqu'à présent, c'est-à-dire construire une enceinte avec des tôles d'une épaisseur pouvant atteindre la dizaine de centimètres, en acier suffisamment résistant, et avec des soudures qui soient sûres ;

— un autre problème est la tenue du combustible. Il se trouve, en effet, que le combustible, sous l'effet des rayonnements et des neutrons, se déforme. Ce problème, on espère le résoudre par des alliages convenables entre l'uranium et, par exemple, du molybdène ;

— enfin, nous avons vu qu'il y avait une gaine en magnésium. Pourquoi le magnésium ? Parce que dans le réacteur il ne faut pas mettre de matériaux qui absorbent trop les neutrons ; l'acier, par

exemple, serait inutilisable dans ce cas et on a donc recours à des matériaux peu absorbants ; or, le magnésium se trouve être un matériau peu absorbant. Malheureusement, son point de fusion est relativement bas et il ne tolère pas des températures de fonctionnement élevé, c'est également une difficulté technique qui empêche d'avoir des températures de vapeur très élevées, donc un rendement thermodynamique élevé.

#### b) *Les échangeurs.*

Ensuite, viennent les échangeurs qui procèdent de la technique classique, mais qui sont évidemment propres à l'énergie nucléaire. Ils consistent en une circulation primaire où circule le gaz carbonique qui sort du réacteur et qui est à 400 ou 500° et d'une circulation secondaire, dans laquelle l'eau est successivement réchauffée, vaporisée, puis surchauffée. Comme le CO<sub>2</sub> est radioactif, l'ensemble des échangeurs se trouve également dans une enceinte protégée par des murs de béton. Par contre, la vapeur qui en sort n'est absolument pas radioactive et peut être utilisée normalement dans une turbine accouplée à un alternateur.

En résumé, pour ce genre de réacteur les problèmes qui se posent sont liés à l'intérêt économique qu'il y a à pouvoir réaliser des réacteurs les plus gros possibles, peu coûteux au MW installé. Mais nous avons vu les problèmes que cela pose, en particulier en ce qui concerne le caisson en acier, qui doit contenir un volume important de graphite et la pression des gaz. Un autre problème est d'obtenir des températures les plus élevées, et là on est limité par les matériaux dont on dispose. Enfin, il y a le problème de la tenue du combustible sous rayonnement, problème qui nécessite de nombreuses études et qui est fondamental dans l'économie des futurs réacteurs nucléaires.

## 2. LES CENTRALES A EAU ORDINAIRE ET A URANIUM ENRICHÉ

#### a) *Le réacteur.*

Dans ce genre de centrale, qui a surtout été développé à l'origine pour faire des moteurs de sous-marins, on utilise l'eau ordinaire, qui n'est pas un excellent modérateur (elle modère bien les neutrons, mais les absorbe aussi) mais qui a l'avantage de ne pas coûter cher. L'eau est utilisée à la fois comme modérateur et comme fluide caloporteur.

Evidemment, de tels réacteurs nécessitent de l'uranium assez enrichi, car, l'eau ordinaire absorbant les neutrons, il n'est pas question d'utiliser de l'uranium naturel. Ces réacteurs sont donc très simples, ils consistent à mettre à l'intérieur du modérateur, c'est-à-dire d'une cuve remplie d'eau, des plaques combustibles gainées également, non point cette fois de magnésium qui ne résisterait pas à l'eau, mais de zirconium ou éventuellement d'acier inoxydable, ce qui nécessite un enrichissement encore un peu plus fort en uranium 235.

Etant donné que la température d'ébullition de l'eau et son point critique sont relativement peu élevés, il se trouve que, si l'on veut maintenir l'eau sous forme liquide, on est conduit à des pressions considérables si l'on veut avoir une température suffisante. C'est pourquoi les réacteurs à eau pressurisée, c'est-à-dire à eau maintenue liquide et sous forte pression, se trouvent également en présence des problèmes liés à la réalisation de cuves suffisamment robustes en acier. Une autre solution consiste à ne pas maintenir l'eau sous forme liquide, mais à la laisser se vaporiser dans le réacteur lui-même, et on a à ce moment-là des réacteurs à eau bouillante qui sont constitués également d'une cuve et d'une masse d'eau dans laquelle trempent les plaques combustibles, lesquelles font bouillir la masse liquide, la vapeur s'échappant par le haut du réacteur.

Etant donné que l'uranium enrichi est extrêmement coûteux, là aussi se pose le problème de pouvoir extraire le maximum de chaleur d'un volume le plus faible possible de réacteur et de combustible. L'avantage de ces réacteurs, c'est surtout leur plus faible encombrement et, par conséquent, leur utilisation commode pour la marine.

#### b) *L'échangeur.*

Là aussi, la vapeur ou l'eau sous pression qui sort du réacteur est amenée dans un échangeur de chaleur qui permet de transférer la chaleur de cette vapeur ou de cette eau à de la vapeur qui est utilisée à son tour directement dans une turbine classique, accouplée à un alternateur.

Ces réacteurs nécessitent, bien entendu, la même protection biologique au moyen de murs en béton ou de parois en acier, ou encore de parois remplies d'eau.

### 3. RÉACTEURS EXPÉRIMENTAUX. — RÉACTEURS HOMOGENES.

#### CENTRALES A EAU LOURDE ET CENTRALES SURRÉGÉNÉRATRICES

Nous venons de décrire deux types de réacteurs industrialisés, mais, bien entendu, il existe d'autres types, pour l'instant au stade expérimental. En particulier, le modérateur et le combustible peuvent être mêlés plus intimement, par exemple en dissolvant un sel d'uranium dans de l'eau ; on obtient à ce moment-là ce qu'on appelle un *réacteur homogène*. On peut également utiliser à la place de gaz carbonique ou d'eau un fluide caloporteur comme le *sodium fondu*, ce qui a l'avantage considérable de ne pas nécessiter une pression de fonctionnement élevée. Par contre, de telles techniques sont encore extrêmement récentes et nécessitent une longue mise au point.

Enfin, pour les réacteurs à uranium naturel, on peut utiliser à la place du graphite comme modérateur de l'*eau lourde*, qui est évidemment plus coûteuse, mais qui peut permettre des économies qui compensent ce coût par la possibilité d'utiliser mieux le combustible.

Le principe des futures *centrales surrégénératrices*, à neutrons rapides, celles qui produiront plus de plutonium qu'elles n'en auront consommé, est assez semblable à ces centrales, sauf qu'elles n'utilisent pas de modérateur. Dans ces conditions, le réacteur est constitué par un ensemble d'aiguilles d'un diamètre de quelques millimètres, formées du combustible. Ces aiguilles sont gainées, par exemple d'acier inoxydable, et sont suspendues côte à côte dans une cuve dans laquelle circule du sodium fondu.

En effet, dans ce genre de réacteur, qui est très concentré (puisque la matière fissile n'y est pas diluée et qu'on l'utilise presque à l'état pur), la puissance à évacuer doit être considérable si l'on ne veut pas consentir à des immobilisations en capital de combustible qui seraient déraisonnables.

Par conséquent, il faut un fluide extracteur de chaleur qui ait une grande capacité calorifique et qui puisse être utilisé à forte température, mais sans forte pression, et pour cela le sodium ou des alliages voisins sont évidemment les fluides les plus appropriés.

La mise au point des piles surrégénératrices fait donc appel à des techniques encore plus d'avant-garde que celles utilisées dans les centrales nucléaires actuelles, ce qui remet leur développement industriel à une époque un peu plus lointaine.

## II. — Les réalisations américaines.

Ces réalisations relèvent de trois programmes principaux : celui de l'Etat, qui se subdivise à son tour en programme militaire et programme civil, celui de l'initiative privée, enfin, celui d'entreprises d'économie mixte créées à cet effet.

Le programme militaire de l'Etat, indépendamment de la production des armes nucléaires, comporte :

— la transformation complète de la Marine militaire (navires, arsenaux, industrie de soutiers), une dizaine de sous-marins sont en service ou achèvement à flot, dont plusieurs « sous-marins purs » (non utilisés normalement en surface) très rapides, prévus pour la chasse ou le lancement d'engins intercontinentaux dans la zone d'opérations de l'Océan Arctique. Un croiseur lance-engins, un porte-avions et un bâtiment d'éclairage (conducteur de flottilles) sont également en chantier.

— des centrales de faible ou moyenne puissance, fixes ou mobiles, pour l'Armée (une en service, une en construction, plusieurs en projet, dont une au Groënland);

— des centrales de faible puissance pour les bases aériennes (une en service) et des essais de moteur nucléaire pour avions (plusieurs essais au sol).

Le programme civil de l'Etat comporte :

— un cargo mixte (en achèvement à flot) (le *Savannah*).

— cinq centrales expérimentales : une en « vraie grandeur » P W R Shippingport 60.000 kW (en service), et quatre expérimentales :

— S R E à Santa Susana (Cal.), 5.000 kW (en service).

— H R E 2 à Oak Ridge (Ten.), 300 kW (en service).

— E B W R à Lemont (Il.), 6.500 kW (en service).

— E B R 2 à Arco (Id.) (en construction).

Le programme privé ne comporte qu'un faible nombre d'entreprises étant donné l'incertitude qui pèse sur leur rentabilité. Ce sont :

— DRESDEN à Joliet (Il.) 180.000 kW, entreprise par Commonwealth Edison et General Electric, sur le point d'entrer en service.

— INDIAN POINT à Peekskill (N. Y.) 275.000 kW, entreprise par Consolidated Edison et Babcock et Wilcox (en construction).

— V B W R à Iwermore (Cal.) 5.000 kW, entreprise par General Electric contre centrale pilote (en service).

— Une autre centrale est prévue par General Electric à Eureka (Cal.).

Le programme d'économie mixte se groupe en trois classes correspondant à des appels successifs de l'US AEC (\*). Les deux premiers appels ont donné naissance à trois projets chacun :

— premier appel en vue de construire des centrales « normales » :

— SHELDON à Hallam (Nebraska) 75.000 kW, en construction;

— FERMI à Lagoon Beach (IL.) 140.000 kW, en construction (c'est la première centrale industrielle à neutrons rapides);

— YANKEE à Rowe (Mass.), de 134.000 kW.

Dans ces projets, le réseau électrique exploite la centrale. Un groupement est formé pour construire la pile. C'est ce groupement qui est subventionné.

— deuxième appel, en vue de construire des centrales pour l'électrification rurale. Trois projets dans les localités suivantes :

— à PIQUA (Ohio), une centrale de 12.500 kW, dont la construction vient de commencer;

— à ANCHORAGE (Alaska), une centrale de 10.000 kW pour laquelle un type de pile avait été retenu, qui a été ensuite jugé trop délicat pour l'Alaska. Le projet est en suspens ;

— à ELK RIVER (Minnesota), une centrale de 22.000 kW. Le projet se trouve ajourné à la suite de difficultés de financement.

— troisième appel, en vue de construire d'autres centrales sans en préciser l'utilisation. Aucune pile n'est en construction, mais on parle de plusieurs projets :

— celui de « NORTHERN STATES » pour 66.000 kW ;

— celui de « EAST CENTRAL » pour 50.000 kW ;

— celui de « PHILADELPHIA ELECTRIC » pour 40.000 kW ;

— celui de « CAROLINAS VIRGINIA » pour 17.000 kW ;

— celui de la ville de « SAXTON » pour 5.000 kW (Pen.).

---

(\*) United States Atomic Energy Commission - Administration publique qui organise et règle les activités américaines dans le domaine atomique.

Il faut y joindre les centrales exportées :

- en Belgique : 12.500 kW (en construction) ;
- en Italie : 150.000 kW (en construction) ;
- à Cuba : puissance faible (en projet).

L'avenir, qui, il y a deux ou trois ans encore, semblait plein de promesses, est regardé maintenant de façon plus réaliste. Il s'écoulera au moins cinq à dix ans avant qu'un réseau américain de distribution d'électricité, ayant à construire une nouvelle centrale, ait un intérêt économique certain à la choisir atomique. Néanmoins, l'effort civil américain, bien qu'assagi, est considérable, surtout si on tient compte du fait que les U. S. A. est le pays où l'énergie classique est, en moyenne, le meilleur marché dans le monde.

### III. — Programme anglais.

Pour fournir du plutonium, deux piles furent construites à Windscale (Cumberland), modérées au graphite et refroidies à l'air, leur puissance, donc leur production de Pu, n'a pas été publiée. A la suite d'un incendie survenu à l'une d'elles en octobre 1957, elles ont été réformées.

A partir de 1954, on construisit de nouvelles piles plutonigènes fournissant de l'énergie électrique comme sous-produit. Il y en aura au total huit, cinq sont en service. Elles sont normalement accouplées à des turbines, fournissant 46.000 kW électriques et environ 400 g de Pu par jour. Deux groupes sont à Calder Hall (Cumberland) et deux à Chapelcross (Comté de Dumfries, Ecosse).

Le programme du C E G B (\*) prévoit actuellement :

Deux centrales à des fins purement civiles, qui sont en construction, seront en service dans un an environ :

- BRADWELL, Comté de Derbyshire : 300.000 kW.
- BERKELEY, Comté de Gloucester : 275.000 kW.

Six autres centrales, à deux piles chacune, sont également au programme :

- HUNTERSTON, à West Killbride, Comté de Largs, Ecosse : 320.000 kW
- HINKLEY POINT, Comté de Somerset : 500.000 kilowatts.

---

(\*) Central Electricity Generating Board, entreprise nationalisée de production d'énergie électrique.

- TRAWSFYNNYD, Comté de Merioneth : 500.000 kilowatts.
- DUNGENESS, Comté de Kent : 500.000 kW.
- SIZEWELL, Comté de Suffolk.
- OLDBURY-on-SEVERN, Comté de Gloucester.

Les trois premières sont en construction. Elles pourront éventuellement fournir du Pu au programme militaire.

Le programme de recherche comprend principalement :

— les piles de puissance nulle :

- DIMPLE, pour l'étude des réseaux.
- ZEPHYR et ZEUS, pour l'étude de la surgénération.
- ZENITH, pour l'étude des piles chaudes.
- NEPTUNE, pour l'étude des piles marines, etc.

— des piles d'essais de matériaux, DIDO, PLUTO, D M T R, MERLIN, HERALD.

Les programmes annoncés par les publications officielles sont poursuivis sans faiblesse mais avec prudence. Leur objectif (cessation de la construction de centrales classiques dans quinze ans), sera poursuivi, mais leur délai en sera vraisemblablement ajusté aux conditions économiques. La première tranche de 5 à 6 millions de kW, prévue initialement pour 1965, est retardée d'un an. Cela représente néanmoins un programme civil extrêmement important. Notons en outre qu'une centrale de 150.000 kW a été exportée en Italie et une autre au Japon.

## TROISIEME PARTIE

### LE PROGRAMME ATOMIQUE FRANÇAIS

#### I. — Les réalisations françaises : principales piles en service.

Malgré les retards par suite de la guerre, les réalisations françaises ont progressé rapidement.

Dès 1948, c'est-à-dire trois ans après la création du C. E. A., la première pile française « Zoé » divergeait à Châtillon. Le combustible était de l'oxyde d'uranium et le modérateur était de l'eau lourde ; la pile comportait un revêtement intérieur de graphite et extérieur de béton.

Une deuxième pile « P 2 » fut mise en service en 1952 à Saclay. Comme « Zoé », c'est une pile à uranium naturel et eau lourde. Sa puissance est de 2.000 kW ; elle est refroidie par gaz comprimé en circuit fermé.

En 1952, Monsieur Félix Gaillard présenta au Parlement le premier Projet de Loi-Programme de 38 milliards d'un plan quinquennal qui a conduit à la construction d'une troisième pile « E L 3 » à Saclay, pile à eau lourde dont le flux est dix fois supérieur à celui de « P 2 » et cent fois à celui de « Zoé » ( $10^{12}$  neutrons  $\text{cm}^2/\text{sec.}$ ) ; sa puissance est de 15.000 kW thermiques.

La même loi prévoyait la construction de deux réacteurs producteurs d'énergie et de plutonium à Marcoule ainsi que la construction d'une usine d'extraction du plutonium :

- « G 1 », d'une puissance de 5.000 kW électriques,
- et « G 2 », d'une puissance de 25.000 kW électriques.

Le combustible est constitué par 100 tonnes d'uranium. « G 1 » est refroidi par l'air atmosphérique, tandis que « G 2 » est refroidi au gaz carbonique sous pression comme le réacteur « P 2 » de Saclay.

« G 1 » doit fournir de l'ordre de 10 kg de plutonium au plus, tandis que « G 2 » en fournira 4 ou 5 fois plus.

« G 3 », identique à « G 2 », est décidé après le vote en 1955 du *deuxième Projet de Loi-Programme* pour le développement de l'énergie atomique, présenté par *M. Gaston Palewski*, et portant à plus de 100 milliards le plan initial.

Ce programme prévoit encore d'autres équipements à Saclay et à Châtillon :

— une pile de puissance nulle au plutonium (*Proserpine*) et une pile de puissance nulle à l'eau lourde et uranium naturel (*Aquilon*) ;

— un synchrotron à protons (*Saturne*) de 2,5 milliards d'électron-volts, le plus puissant en Europe continentale ;

— des laboratoires de physique, chimie et biologie.

## II. — Le nouveau programme atomique français (1957-1961).

En 1957, le Parlement français a voté un *nouveau plan de développement de l'énergie atomique* pour les années 1957 à 1961 présenté par *M. Guille* au nom du Gouvernement Guy Mollet. Il portait sur 200 milliards en 5 ans et prévoyait :

1° Le développement de l'infrastructure pour la recherche scientifique et technique (25 milliards) ;

2° La construction de 4 piles expérimentales à faible puissance (8 milliards) :

— 2 piles de 1.000 kW, l'une à Grenoble et l'autre à Châtillon servant en particulier à l'étude des dispositifs de protection contre les rayonnements.

— 1 pile pour la mesure précise des absorptions neutroniques,

— 1 pile à neutrons rapides surrégénératrice au plutonium. Cette pile doit permettre l'étude de la combustion plus complète de l'uranium naturel dont 0,7 % seulement est actuellement fissile dans les piles en service ;

3° La construction de deux réacteurs expérimentaux poussés, devant servir à l'étude de la tenue des matériaux sur des flux de radiations intenses :

- 1 pile à haut flux (coût éventuel, une dizaine de milliards) ;
- 1 pile à haute température permettant d'étudier les problèmes soulevés par l'obtention de fortes températures dans les piles atomiques (coût environ 5 milliards) ;

4° La construction de prototypes de production d'énergie dans des conditions industrielles (coût 24 milliards) :

- 1 pile au sodium fondu refroidi par circuit de sodium liquide ;
- 1 pile à la glucine qui paraît être un modérateur excellent ;
- 1 pile surrégénératrice à neutrons rapides qui devra suivre la pile à neutrons rapides lorsque cette dernière aura donné des résultats.

Ce prototype doit constituer la machine de l'avenir permettant de brûler complètement l'uranium par la voie du plutonium ;

Les paragraphes 2°, 3° et 4° ci-dessus contenaient un programme de pile qui a évidemment évolué depuis lors, compte tenu du résultat des études réalisées. Certains types de réacteurs ont été abandonnés au profit d'autres variantes, mais l'esprit du programme a été maintenu, qui consiste à ne pas disperser les efforts sur trop de techniques différentes.

Actuellement, les deux plus importants réacteurs décidés sont « *EL 4* », prototype de centrale à eau lourde de 100 kW électriques et « *Rhapsodie* », réacteur à neutrons rapides, destinés à mettre au point les futures centrales surrégénératrices au plutonium.

5° La construction de grands appareils et équipements spéciaux, pour 32 milliards environ ;

6° La production de matériaux fissiles destinés à faire fonctionner les piles et autres appareils. Il est prévu :

- 49 milliards, pour la production de l'uranium naturel nécessaire au C. E. A. ;
- 19 milliards d'équipement pour l'étude et la production des autres combustibles nucléaires, tels le plutonium, le thorium et l'uranium 233 obtenus dans les piles à partir du thorium ;
- 38 milliards pour la production de plutonium à Marcoule, dépense correspondant au fonctionnement de ce Centre ;

7° La construction d'une usine de séparation des isotopes de l'uranium.

La France a choisi certes la voie du plutonium et continue à donner priorité aux études des réalisations correspondantes parce que cette voie apparaît comme étant la seule qui permette d'extraire toute l'énergie contenue dans l'uranium.

Du point de vue fissibilité, le plutonium sera un combustible comparable à l'isotope 235 de l'uranium, seul isotope directement utile, mais qui n'existe malheureusement que dans la proportion de 0,7 % dans l'uranium naturel.

Or, certains réacteurs d'études ne pourront pas fonctionner avec de l'uranium naturel, mais exigent un combustible plus riche en matière fissile, telles les piles-piscines.

D'autre part, l'uranium enrichi est utile pour la propulsion navale qui nécessite des machines peu encombrantes et pour certaines centrales électriques dont il permet d'améliorer les performances.

Le plutonium ne pourra être utilisé que dans un certain nombre d'années. En attendant, il faut de l'uranium enrichi par séparation des isotopes 238 et 235.

Les Etats-Unis ont bien proposé aux pays d'Europe des fournitures d'uranium 235, mais à des conditions qui en limitent l'emploi et en les soumettant à des agréments préalables et des inspections qui peuvent être gênantes notamment sous l'angle de la propriété industrielle, sans parler qu'ils ne peuvent être utilisés à des besoins de défense nationale.

Le Gouvernement a donc décidé que la France devait disposer d'un approvisionnement libre en uranium enrichi : un premier crédit de 25 milliards a été inscrit dans la Loi-Programme. Actuellement le choix du terrain à Pierrelatte est chose faite.

### III. — Les Centrales de puissance de « E. D. F. ».

Parallèlement à ce programme, Electricité de France a mis en service sa première centrale « E. D. F. 1 » à *Chinon*, du même type que la pile « G 2 » fournissant 60.000 kW.

« E. D. F. 2 » mise en chantier en 1957, également à *Chinon* produira 170.000 kW.

Le projet de Loi-Programme relatif à l'Équipement économique général, présenté par le Gouvernement de M. Michel Debré au mois d'avril 1959, prévoit la construction de deux nouvelles centrales : « E. D. F. 3 » de l'ordre de 300.000 kW et « E. D. F. 4 » d'au moins 400.000 kW.

Initialement, il avait été prévu que les opérations se succéderaient à intervalles de 18 mois. Ce programme a été quelque peu distendu, mais en respectant tout de même le doublement de la puissance installée tous les 3 ou 4 ans.

Avec le lancement de « E. D. F. 4 » en 1962, la puissance totale installée passerait à 600.000 kW en 1964 et à 1 million de kW en 1966.

Ces centrales sont basées sur l'utilisation de la filière à uranium naturel et graphite. Cependant, il est prévu la construction d'autres centrales avec de nouvelles filières portant la puissance totale en 1965 à 1 million de kW et à 1.400.000 kW en 1966.

Au total, pour les années 1960 à 1962, E. D. F. engagera 133 milliards pour la production d'énergie électrique avec une possibilité de complément de 44,7 milliards et la production de 800.000 kW d'origine nucléaire.

#### *Autres réalisations atomiques françaises.*

Par ailleurs, la France ne néglige pas la question de la propulsion atomique des sous-marins. La réalisation du premier sous-marin atomique français a commencé.

## QUATRIEME PARTIE

### PLACE DE L'ENERGIE ATOMIQUE ET DES CENTRALES NUCLEAIRES DANS L'ECONOMIE MODERNE

Ainsi que nous venons de le voir, les projets mondiaux de développement des applications pacifiques de l'énergie atomique revêtent une ampleur surprenante.

Si la possession de la Bombe A et surtout de la Bombe H ont été, au départ, la cause de cet extraordinaire développement, d'autres facteurs à la fois économique, démographique et politique n'ont pas manqué depuis lors d'influer sur le développement de l'énergie atomique.

#### I. — Les besoins énergétiques de l'Europe occidentale et de la France.

Trois causes essentielles conduisent à l'accroissement de la demande d'énergie :

1° L'augmentation de la population du globe qui, au rythme actuel, aura doublé dans 50 ans ;

2° L'accession de pays encore sous-développés à la révolution industrielle, tels la Chine, l'Inde et l'Afrique ;

3° Enfin, l'industrialisation accrue de la plupart des pays.

Dans tous les pays industrialisés du monde, la consommation d'énergie électrique progresse dans une proportion conduisant au doublement de la production en 7 à 10 ans.

La consommation d'énergie par habitant d'un pays est d'ailleurs le test du niveau de vie de ses habitants, et partant, de son degré d'industrialisation.

Le tableau ci-après reproduit, pour les principaux pays de l'Occident, les consommations brutes d'énergie. Les productions correspondantes d'énergie électrique, l'indice de la production industrielle de ces mêmes pays et la consommation annuelle d'énergie par tête d'habitant.

PAYS	INDICES de la production industrielle. (1)		CONSOMMATION annuelle d'énergie par habitant. (2)	PRODUCTION d'électricité. (3)		CONSOMMATION brute d'énergie. (4)	
	1950	1950		1950	1958	1950	1958
U. S. A.....	84	105	7,8	388,7	724	1.158	1.432
Royaume-Uni .....	94	116	4,6	63,3	107,5	220,4	242,6 <sup>(5)</sup>
Allemagne fédérale....	72	154	3,4	42,2	89,6	127,5	182,9
France .....	87	151	2,7	33,6	61,8	90	121,3
Italie .....	79	142	1	24,4	44,4	25,5	49,4
Pays C. E. C. A.....	80	147	2,4	117,8	225,4	294	411

(1) Valeur 100 = 1953.

(2) En tonnes (équivalent de charbon).

(3) En milliards de kWh.

(4) En millions de tonnes (équivalent de charbon).

(5) Consommation de l'année 1956.

En Allemagne occidentale, la production d'électricité a plus que doublé en 8 ans.

En France, sans la récession de 1958, la consommation aurait également doublé en 7 ou 8 ans. De toute manière, on progresse actuellement à la cadence moyenne d'une augmentation de la consommation de l'ordre de 7 % par an.

Cet accroissement considérable de la demande d'énergie a eu pour résultat un déficit chronique d'énergie des pays de la C. E. C. A. pendant ces dernières années, les obligeant à des importations considérables de charbon, en particulier des U. S. A. portant sur 30 à 40 millions de tonnes par an pendant les trois dernières années : 38 millions de tonnes en 1956, 44 en 1957 et 31,8 en 1958.

La France seule a importé 25 millions de tonnes de charbon de 1956 à 1958 : 8,8 millions de tonnes en 1956, 9,7 en 1957 et 4,9 en 1958.

Sans la récession de 1958, sans l'apparition du gaz de Lacq et du pétrole saharien, le déficit eût été encore considérable en 1959. Mais du fait de ces facteurs nouveaux, la situation s'est renversée

en 1958 et ce sont des tonnages à peu près équivalents de charbon qui sont en stocks actuellement et tous les pays de la C. E. C. A., producteurs de charbon, cherchent à résilier les contrats d'importation conclus dans le passé.

L'évolution des consommations d'énergie pendant les années 1957 et 1958 des principaux pays de la C. E. C. A. ressort du tableau ci-après :

P A Y S	CONSOMMA-TION totale d'énergie.		CHARBON		ELECTRICITE				PETROLE		GAZ	
	1957	1958	1957	1958	thermique.		hydrau-lique.		1957	1958	1957	1958
					1957	1958	1957	1958				
Allemagne oc-cidentale ...	190	182,9	166	153,1	29,6	30,6	4,9	5,3	18,4	24	0,6	0,6
France + Sarre	122,2	121,3	88,2	80,9	13	11,7	10	12,9	23	25,9	0,9	1,6
C. E. C. A. ....	420,8	411,6	314,3	287	57,7	56,8	28,4	33,4	70,2	82,4	7,9	8,9

Certes, une hydraulité favorable a réduit la production d'électricité à partir des centrales thermiques, venant aggraver les effets de la récession sur la production charbonnière.

Mais ce tableau fait surtout apparaître le fait que, d'une année sur l'autre, les six pays de la C. E. C. A. ont augmenté considérablement leur consommation de pétrole (12,2 millions de tonnes d'équivalent charbon d'une année sur l'autre, soit de 16 % environ).

La France figure pour près de 3 millions de tonnes dans ce bilan et l'Allemagne occidentale pour plus de 5,5 millions de tonnes en ce qui concerne le pétrole, mais la France y figure également pour un accroissement de 700.000 tonnes (équivalent charbon) de la consommation de gaz.

L'apparition massive du pétrole et du gaz en Europe occidentale appelle la réflexion sur la cadence à donner au développement de la production d'énergie électrique à base d'énergie nucléaire, d'autant plus que de nouvelles découvertes de pétrole et de gaz viennent à chaque instant grossir les ressources connues.

Dans son rapport annuel de 1958, qui vient de paraître, le Bureau de Recherches de Pétrole vient de confirmer que : « au total, sur deux cent sept forages réalisés dans la zone franc en 1958,

vingt-sept, soit 13 %, se sont révélés productifs, le Sahara venant largement en tête avec le taux extraordinaire de 41 % de puits productifs ».

Le développement des découvertes des années précédentes a permis de faire passer le tonnage des réserves prouvées récupérables de 105 à 505 millions de tonnes de pétrole et de 203 à 760 milliards de mètres cubes de gaz naturel. Ainsi, sur les bases de réserves de 1958 (dépassées depuis), un potentiel de production de 25 millions de tonnes annuelles était mis en évidence : il correspondait à la consommation française la même année.

Ces découvertes de pétrole et de gaz en quantité insoupçonnée font que non seulement tous les besoins français en pétrole peuvent être couverts dès que les « pipes » seront en état de débiter, mais bientôt tous les pays de l'Europe occidentale pourront être alimentés à partir de cette production saharienne.

Enfin, l'éventuelle arrivée du gaz d'Hassi R Mel en Europe est de nature à doubler les disponibilités d'énergie de notre pays.

Si l'arrivée en Europe des ressources sahariennes pouvait être garantie, le problème du déficit chronique d'énergie des pays occidentaux serait résolu pour les 15 à 20 ans à venir.

Le problème serait alors plutôt de conserver aux sources traditionnelles d'énergie (charbon) une place raisonnable dans la consommation énergétique globale des pays de l'Europe occidentale.

La question se pose donc de savoir si, dans ces conditions, il y a encore la même urgence à poursuivre à un rythme accru l'effort d'équipement atomique de notre pays.

## II. — Les perspectives économiques de l'énergie atomique.

### Le prix de revient.

A l'heure actuelle, deux techniques seulement ont donné lieu à la construction de centrales prototypes en service aux U. S. A., en Grande-Bretagne et en France :

— la filière à l'uranium naturel et au graphite (Grande-Bretagne et France) ;

— la filière à l'uranium enrichi et à l'eau ordinaire (U. S. A.).

Chacune de ces filières a été adoptée par ces pays respectifs pour des raisons autant historiques que techniques que nous avons exposées plus haut.

Si on connaît bien les avantages spécifiques de chacune de ces filières, on en connaît assez mal la valeur économique et encore moins la valeur économique future, compte tenu des possibilités de progrès que chacune d'elles recèle en puissance.

Les évaluations avancées par les experts pour l'une et l'autre des deux filières varient entre 3,7 et 7 francs le kWh pour les futures centrales qui suivront les prototypes actuels (nécessairement plus chers).

Les espoirs de voir baisser les prix dans l'avenir sont fondés sur le fait que :

— les plans actuels prévoient des sécurités multiples qui coûtent cher et qui se révéleront probablement à l'expérience comme excessives ;

— les matériels ne sont pas encore construits en série et d'après des spécifications qui s'avèreront également comme trop largement calculées ;

— le combustible est cher et il faut attendre des baisses de prix importantes sur les matières premières nouvelles (zirconium, uranium, baryllium) ;

— l'expérience manque encore sur la tenue sous irradiation du combustible, élément important du bilan économique ;

— le recyclage du plutonium permettra vraisemblablement d'améliorer le bilan économique des centrales.

Bien entendu, il faut aussi faire des réserves quant aux mauvaises surprises que peut réserver l'avenir, en particulier en ce qui concerne la durée de vie des réacteurs, élément fondamental du calcul de l'amortissement. Mais les premiers réacteurs ont maintenant 10 ou 15 ans et marchent encore très bien.

On peut donc penser que l'énergie nucléaire deviendra un jour compétitive. Les avis diffèrent que sur le délai nécessaire : 5, 10 ou 15 ans ?

Dans certaines conditions géographiques et de facteurs de charge particuliers, on pourra même obtenir plus tôt des prix de revient inférieurs aux prix du kW d'origine classique.

### III. — Intérêt d'un programme d'énergie nucléaire.

#### 1. — LE PROGRAMME ATOMIQUE EST NÉCESSAIRE POUR FAIRE FACE AUX BESOINS FUTURS EN ÉNERGIE

Nous avons vu plus haut que la situation énergétique de la France et des pays de l'Europe occidentale, tout en suivant une courbe ascendante rapidement croissante, ne devait pas créer d'inquiétudes dans l'immédiat grâce à l'appoint des nouvelles ressources découvertes au Sahara.

D'autre part, nous avons vu que l'énergie atomique n'était pas encore compétitive, mais qu'elle le serait dans une période de 5 à 15 années, entre 1965 et 1975, c'est-à-dire à l'époque même où la demande d'énergie sera telle que les ressources classiques ne paraissent plus en mesure d'y suffire.

En effet, on sait que la production charbonnière n'est pas susceptible de progressions sensibles et qu'elle est plutôt appelée à plafonner, que si les sites hydroélectriques offrent encore d'intéressantes possibilités, leur exploitation deviendra de plus en plus onéreuse, enfin, si dans l'avenir immédiat le pétrole et le gaz, dont les réserves s'accroissent de jour en jour, sont à même de faire face à tous les besoins, leurs ressources ne sont pas infinies et leur sécurité d'approvisionnement soumise à quelques incertitudes.

Certes, sur ce dernier point, les opinions ont évolué depuis les récentes découvertes. On peut penser que les ressources mondiales sont telles que ceux-la même qui auraient pu influencer sur la régularité des fournitures n'ont plus intérêt à le faire, car ils courent le risque sérieux d'être relayés dans leur rôle de fournisseurs par d'autres pays, nouveaux producteurs, et de se voir privés de ressources financières importantes pour leur économie. Mais, à cet égard, les situations pourront encore évoluer.

Il faudra donc disposer, au plus tard en 1975, d'une énergie de relai des ressources classiques. Cette énergie de relai est sans nul doute l'énergie atomique dont les possibilités paraissent pratiquement illimitées.

Le problème qui se posera alors sera de savoir si l'énergie nucléaire ne fera que compléter les sources traditionnelles d'énergie en faisant face aux besoins nouveaux, ou si elle s'y substituera totalement. Nous laisserons à d'autres le soin de conclure sur ce sujet.

Pour tous les pays soucieux de leur avenir, le problème qui se pose dans l'immédiat est :

a) L'emploi judicieux de toutes leurs ressources possibles, compte tenu des investissements réalisés, c'est-à-dire un problème de coordination de leurs moyens énergétiques ;

b) La préparation de ressources nouvelles susceptibles de faire face aux besoins nouveaux qui naîtront du développement souhaité du niveau de vie de la population.

Il ne fait pas de doute qu'il faut dès maintenant réunir les moyens propres à préparer la participation future de l'énergie nucléaire au développement économique.

## 2. — LE PROGRAMME ATOMIQUE DOIT TENIR COMPTE DES EFFORTS CONSENTIS PAR LES AUTRES NATIONS ET DES POSSIBILITES FINANCIÈRES DU PAYS

La France se doit d'avoir une industrie nucléaire prête à entrer en jeu au moment voulu ; la seule question posée est de savoir quel doit être le rythme de son développement.

Ce rythme est bien entendu fonction des besoins futurs, du prix de revient lui-même dont l'amélioration est conditionnée d'une certaine manière par l'ampleur des programmes. Il doit donc aussi tenir compte de la cadence des programmes des autres nations, plus particulièrement de celles mieux pourvues encore que la France en énergie classique (tels les U. S. A.). Si nous ne voulons pas être obligés d'importer des techniques et des matériels payables en devises, le jour où le kWh nucléaire sera compétitif, et où le pays en aura besoin, nous devons avoir développés suffisamment nos techniques et notre industrie nationales.

Notre programme de prototypes doit donc correspondre à une activité continue suffisante pour permettre à des équipes d'avoir une expérience valable.

Il est à ce point de vue intéressant de comparer le montant (chiffres approximatifs) des dépenses consacrées à leurs programmes atomiques par les trois principaux pays : les U. S. A., la Grande-Bretagne et la France au cours des quatre dernières années. Il est vrai que les comparaisons sont faussées du fait de la part importante des programmes militaires en Grande-Bretagne et surtout aux U. S. A.

PAYS	1955-1956	1956-1957	1957-1958	1958-1959
	(En milliards de francs.)			
U. S. A. (A. E. C.).....	800	700	850	1.100
Grande-Bretagne .....	60	80	110	140
France .....	55	92	83	87

Ce tableau montre que les dépenses consenties par la France, tout en étant du même ordre de grandeur que celles de la Grande-Bretagne, y sont cependant nettement inférieures et apparaissent très faibles par rapport à l'immense effort consenti par les Etats-Unis, en grande partie militaire, il est vrai.

On se rendra mieux compte des efforts consentis pour l'énergie atomique en les comparant aux dépenses budgétaires.

PAYS	RAPPORT :			
	DEPENSES ATOMIQUES, DEPENSES BUDGETAIRES			
	1955-1956	1956-1957	1957-1958	1958-1959
	%	%	%	%
U. S. A. (A. E. C.).....	2,90	2,50	2,90	3,20
Grande-Bretagne .....	1,17	1,38	1,91	3,70
France .....	1,19	1,98	1,62	1,58

Les années budgétaires ne correspondant pas en Grande-Bretagne, aux Etats-Unis, avec l'année civile, les comparaisons ne sont pas absolument rigoureuses.

Cependant, on voit que pour le dernier exercice, si la France consacre 1,58 % de ses dépenses budgétaires à l'énergie atomique, la Grande-Bretagne y consacre 2,10 % et les U. S. A. 3,20 %. En comparant les dépenses atomiques au revenu national, on arrive à des conclusions analogues :

U. S. A. : 0,68 % ; Grande-Bretagne : 0,48 % ; France : 0,35 %.

La part réservée par la France dans son revenu national est inférieure de un tiers à la part consacrée par le Royaume-Uni à ses dépenses atomiques et elle est inférieure de plus de moitié à l'effort consenti par les U. S. A. Cette différence est normale, la Grande-Bretagne ayant un besoin beaucoup plus pressant d'énergie que la France, et les Etats-Unis des ressources et des possibilités d'une échelle différente de la nôtre.

En résumé, on peut dire que la France accomplit un effort sérieux, mais non déraisonnable, en matière atomique, et que la charge financière est loin d'être insupportable. Inférieure à celles de nos partenaires de l'Alliance Atlantique, elle est en fin de compte à l'échelle de notre pays.

Enfin, il reste une considération non négligeable, c'est l'influence éventuelle d'une industrie atomique sur la balance des comptes. Ainsi que nous l'avons déjà dit plus haut, les U. S. A. et la Grande-Bretagne sont déjà parvenus à exporter leur technique de façon intéressante pour l'équilibre de leur balance des comptes.

Dans le même ordre d'idées, il ne faut pas oublier que l'industrialisation des pays d'Outre-Mer et des pays insuffisamment développés nécessitera l'installation de centrales petites et moyennes réparties sur les points les plus divers du globe. Il est probable que les centrales atomiques seront à long terme les mieux qualifiées pour satisfaire dans certains cas aux impératifs divers que poseront ces demandes d'énergie.

### 3. — LE PROGRAMME ATOMIQUE MINIMUM DE LA FRANCE

Tout le problème est donc de savoir quelle doit être la cadence minimum de notre équipement nucléaire national.

Au point de vue des études et des prototypes, le programme atomique français représente un minimum.

Ainsi que nous l'avons exposé au chapitre consacré au programme atomique français, le projet de loi relatif à l'équipement économique général, voté récemment par le Parlement pour les années 1960 à 1962, prévoit le lancement de :

— une centrale prototype à eau lourde de 100 mW (E L 4) en 1960 ;

— une centrale au graphite de la filière française de 400 mW (E. D. F. 4) en 1962 ;

— deux centrales de 150 mW au titre du programme U. S. A.-Euratom, l'une dans le programme garanti et l'autre dans le programme optionnel.

« E. L. 4 » est le prototype d'une nouvelle filière à eau lourde qu'il est indispensable d'expérimenter le plus rapidement possible si on veut que la technique nucléaire française ne perde pas le bénéfice de l'effort déjà accompli et progresse au même rythme que les techniques étrangères concurrentes.

Le programme des centrales U. S. A.-Euratom doit permettre la construction en Europe de centrales suivant la technique américaine d'uranium enrichi qui intéresse au plus haut point nos techniciens et nos industriels.

D'autre part, le C. E. A. a à son programme le réacteur expérimental « Rapsodie » qui doit ouvrir ultérieurement la voie aux centrales surrégénératrices qui permettent de brûler non point 1 à 2 %, mais 40 à 50 % de l'énergie de fission potentielle de l'uranium naturel, multipliant d'un seul coup les réserves énergétiques du monde, et susceptible de faire faire aux réacteurs — sur le plan économique — un bond en avant très important.

Toutefois, ces réacteurs nécessitent une première charge de plutonium. Ils ne pourront donc être développés que dans la mesure où ces réacteurs à uranium naturel ou enrichi du type actuel, les auront précédés, ce qui est une façon de valoriser la production de plutonium des réacteurs actuels.

Ainsi, même si la technique des réacteurs surrégénérateurs était connue, il faudrait quand même construire des réacteurs du type actuel.

Enfin « E. D. F. 4 » est dans la ligne des centrales prototypes dont le programme a été établi ou envisagé par E. D. F. en liaison avec le C. E. A. en se basant sur les considérations suivantes :

— réaliser successivement des centrales prototypes à des intervalles tels que chaque nouvelle réalisation bénéficie de l'expérience de la précédente ;

— rôder l'industrie française à la technique nucléaire en lui donnant un travail régulier permettant de maintenir des bureaux d'études spécialisés et de créer une infrastructure minimum.

C'est sur le rythme du programme E. D. F. que l'on peut discuter. Les prévisions faites pour 1965 et envisagées dans la loi-programme de développement de l'économie générale et avoisinant 850 mW (1.000 mW en tenant compte du programme Euratom) nous paraissent être un optimum, compte tenu des perspectives ouvertes à la France et à l'Europe par les sources pétrolières et gazières découvertes au Sahara.

### **Conclusion.**

Avec le programme minimum ci-dessus rappelé, la France sera prête à répondre aux évolutions prévisibles de la situation. La cadence d'expansion de l'énergie atomique doit s'établir entre des limites telles que le doublement de la puissance installée se situe entre 3 et 5 ans.

Mais seule l'expérience permettra de connaître les possibilités et les nécessités réelles d'adaptation de l'industrie française.

Pour l'instant, il nous paraît opportun de mettre l'accent sur la recherche fondamentale plutôt que sur la construction en série de centrales nucléaires. Le programme de construction de centrales doit être conçu dans une optique d'étude et de développement de la technologie des réacteurs, d'étude et de traitement des combustibles, enfin, du maintien d'un rythme suffisant de l'industrie française nucléaire.

La recherche d'une production d'énergie électrique à base atomique, en dehors de ces impératifs, ne correspond pas à un besoin immédiat.

En outre, comme la France doit assurer le financement des investissements indispensables à l'équipement du pays, de l'Algérie et de la Communauté, participer à l'aide aux pays sous-développés, on peut penser que s'il faut maintenir de façon intégrale le programme minimum défini par le C. E. A., le développement prévu dans le secteur de la construction de centrales atomiques doit être conçu de façon à ne pas entraver les investissements dont le pays a tant besoin par ailleurs.

Nous ne voudrions pas terminer ce rapport sans rendre hommage à l'équipe de chercheurs français auxquels la France doit d'avoir progressé si rapidement dans un domaine où la guerre l'avait sérieusement handicapé. Il faut aussi rendre hommage à ceux qui au Gouvernement et devant les Assemblées ont défendu les crédits indispensables à la recherche.

On ne peut que faire confiance au responsable actuel du secteur de l'énergie atomique — M. Jacques Soustelle — pour que l'effort commencé soit poursuivi avec énergie pour ne pas perdre le bénéfice de l'effort accompli, compte tenu cependant de la conjoncture charbonnière tant française qu'européenne et de l'importance croissante de l'apport saharien.