JOURNAL DE LA SOCIÉTÉ STATISTIQUE DE PARIS

R. GIBRAT

Les statistiques de ressources énergétiques et l'avenir à long terme de l'énergie nucléaire

Journal de la société statistique de Paris, tome 106 (1965), p. 20-43

<http://www.numdam.org/item?id=JSFS_1965__106__20_0>

© Société de statistique de Paris, 1965, tous droits réservés.

L'accès aux archives de la revue « Journal de la société statistique de Paris » (http://publications-sfds.math.cnrs.fr/index.php/J-SFdS) implique l'accord avec les conditions générales d'utilisation (http://www.numdam.org/conditions). Toute utilisation commerciale ou impression systématique est constitutive d'une infraction pénale. Toute copie ou impression de ce fichier doit contenir la présente mention de copyright.

NUMDAM

Article numérisé dans le cadre du programme
Numérisation de documents anciens mathématiques
http://www.numdam.org/

V

LES STATISTIQUES DE RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES ET L'AVENIR A LONG TERME DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE (1)

" Wie aus der Ferne " (Schumann)

Les besoins d'énergie nucléaire apparaissent aujourd'hui grands, à terme relativement court. Les ressources en combustibles nucléaires apparaissent aujourd'hui faibles vis-à-vis de ces besoins tout au moins avec les solutions techniques actuellement au point. Cette discordance domine aujourd'hui toutes les politiques énergétiques nationales à moyen et à court terme et si le tableau que présente aujourd'hui la production de l'énergie nucléaire est aujourd'hui pour la première fois franchement favorable, ce n'est plus l'image d'Épinal des premiers bâtisseurs montrant, d'une part une énergie nucléaire presque gratuite et en quantité presque infinie, obtenue sans difficultés techniques importantes, d'autre part une Europe certaine de ne jamais trouver dans son sol même une faible partie de ses nouveaux besoins futurs en combustibles classiques.

L'évaluation des besoins futurs et des ressources correspondantes est donc fondamentale. Une description statistique est nécessaire. Nous exposerons donc dans une première partie les données relatives à l'énergie nucléaire, nous contentant de rappeler brièvement les principales données relatives aux autres formes d'énergie. Nous traiterons particulièrement les cas de la Communauté européenne de l'énergie atomique EURATOM, puis des U. S. A. et finalement de la France. Une deuxième partie fournira les éléments de la solution et en discutera les principales caractéristiques.

(1) Communication faite à la Societe sous le même titre le 18 décembre 1963.

Première partie

BESOINS ET RESSOURCES

1. RÉSERVES ACTUELLES

Une excellente étude (2) a été publiée fin 1963 par l'Agence d'Approvisionnement de la Communauté européenne de l'Énergie atomique (EURATOM). Elle permet de définir le marché probable de l'uranium *dans le monde libre* jusqu'en 1980. Nous lui ferons de très larges emprunts. Donnons tout de suite en tableau I l'état des réserves d'uranium au 1er janvier 1962.

Tableau I — RÉSERVES D'URANIUM AU 1er JANVIER 1962 (MONDE LIBRE)

	Minerai en millions de tonnes	Teneur moyenne approximative	Uranium métal en tonnes métriques
U. S. A.	64	0,2 %	130 000
Canada	143	0,1 %	145 000 (*)
Afrique du Sud	680	0,017 %	115 000 (**)
Autres pays	—	—	60 000
TOTAL DU MONDE LIBRE			450 000

(*) D'autres évaluations font etat de 60 000 t supplémentaires qui seraient également récupérables.
(**) Évaluation de la Chambre des Mines de l'Union sud-africaine, pour les réserves exploitables à un prix de 8 $ lb d'U_3O_8.

Nous tenons maintenant à reproduire exactement les explications du rapport : « ne figurent que les réserves dont l'exploitation est compatible ou serait compatible avec un prix de vente de l'oxyde U_3O_8 contenu dans des concentrés chimiques, égal ou inférieur à 8 à 10 dollars par livre d'oxyde contenu. Bien que l'on puisse parfaitement concevoir de déterminer les réserves globales sans considération de prix, car ceux-ci dépendent de conjonctures économiques variables, nous pensons qu'il faut, au moins à un certain stade, s'arrêter au prix de référence le plus généralement admis dans les circonstances présentes. En effet, rien ne serait plus fallacieux que de retenir un tableau dans lequel apparaîtraient des tonnages correspondant à n'importe quelles concentrations naturelles d'uranium, sans tenir compte du coût d'extraction du minerai et de son traitement en usine, ainsi que du rendement de ces diverses opérations. En revanche, lorsque l'on recherche toutes les options possibles pour couvrir les besoins futurs, il ne faut pas méconnaître l'intérêt que peuvent présenter ces ressources aujourd'hui trop chères.

D'autre part, dans le tableau donné en annexe, nous pensons n'avoir fait figurer que des réserves qui sont démontrées ou évaluées avec un degré de certitude à peu près homogène. Nous désignons donc ici par le terme de « réserves » toutes les quantités de minerai dont les caractéristiques de tonnage et de teneur et les conditions de gisement ont été précisées soit par des travaux miniers de reconnaissance, soit par des sondages suivant la nature des gisements. Sont donc exclues les évaluations résultant d'extrapolation non contrôlées ».

Nous avons tenu à reproduire intégralement ce passage du rapport, car sans cela il n'est pas possible d'interpréter correctement les chiffres et de tirer des conclusions. Le

(2) Le problème des ressources et de l'approvisionnement en uranium à long terme 1963. EURATOM document 414 f.

tableau annexe auquel il est fait allusion est évidemment plus complet que le tableau II : indiquons seulement que sur les 60 000 t des « autres pays » la France compte pour 26 000 t d'uranium naturel (19 millions de tonnes de minerai : 0,14 % de tonnes), le Gabon pour 5 000 t et le Congo (le grand pourvoyeur initial pour 8 000 t seulement). A noter encore que le monde libre a extrait environ 180 000 t avant 1962. Il aura donc mis en évidence depuis la guerre 630 000 t d'uranium.

Au rythme d'extraction de l'année 1960 (30 000 t) la situation est donc très préoccupante : 15 années de réserve. Cependant il y a encore un an, personne ne semblait inquiet. L'industrie de l'uranium est dans le monde libre en effet en état de grave crise due à une surproduction manifeste. Les U. S. A. ont étalé fortement leurs achats, réduisant ceux à l'étranger dans des conditions très dures. Ainsi la capacité de production du Canada (12 000 t en 1959 avec 25 mines et 19 usines de traitement) sera ramenée dès 1965 à celle d'un seule usine (800 t an) qui ne sera d'ailleurs pas saturée. Ce paradoxe traduit le fait que d'une part les besoins militaires ont beaucoup diminué (Le président Johnson a annoncé il y a quelques mois une réduction de 40 % de la production des usines de séparation isotopique d'uranium donc de la consommation d'uranium métal), d'autre part les besoins civils sont encore très faibles comme nous le verrons plus loin. On prévoit d'ailleurs que les prix en vigueur en 1962 (8 à 10 dollars par livre d'oxyde d'uranium contenu) baisseront jusqu'à 4 à 6 dollars de 1965 à 1970 pour remonter de 2 dollars au début de la prochaine décennie.

2. ÉVOLUTION D'ICI 1970

Une étude approfondie était donc nécessaire : il fallait d'abord déterminer l'évolution des réserves jusqu'en 1970 ce qui est facile : les contrats actuels des U. S. A. vont pratiquement jusqu'à cette date et les programmes de production d'énergie nucléaire sont pratiquement définis dans le monde entier (par exemple par notre Ve Plan français). La seule incertitude réside dans un renversement possible du climat politique mondial influençant la situation militaire. Nous en tiendrons compte plus loin. Le tableau II donne finalement les prévisions d'extraction et les réserves au 1er janvier 1971 dans les mêmes conditions que le tableau précédent.

Il ne resterait plus aux États-Unis que quelque 59 000 t de métal en réserve au 1er janvier 1971 ce qui est bien peu pour un pays qui fera largement appel à l'énergie nucléaire; le Canada et l'Afrique du Sud, avec respectivement 120 000 et 97 000 t de métal

Tableau II — ÉVOLUTION DES RÉSERVES DE 1962 A 1970
(en tonnes métriques, métal uranium)

	Reserves au 1er janvier 1962	Extraction pour la période 1962-1966	Extraction pour la période 1967-1971	Réserves au 1er janvier 1971
U. S. A	130 000	47 000	24 000	59 000
Canada	145 000	22 200	2 800 (*)	120 000
Afrique du Sud	115 000	13 000	5 000	97 000 (**)
Autres pays	60 000	9 000	7 000	44 000
TOTAL DU MONDE LIBRE	450 000	91 000	38 800	320 000

(*) Jusqu'en 1969 inclus.
(**) Jusqu'en 1972 inclus.

en réserve, seront les seuls, si la conjoncture actuelle des réserves se maintenait, à pouvoir livrer de l'uranium. Mais il est peu probable que l'Afrique du Sud puisse augmenter très largement sa production, au delà d'un niveau de 5 à 8 000 t par an, cette production étant étroitement liée à celle de l'or.

Aux États-Unis l'U. S. A. E. C. a décidé récemment une politique d'étalement des contrats en cours d'exécution jusqu'en 1968 et d'achats supplémentaires pendant les années 1969-1971, égaux aux quantités reportées, soit au maximun 12 000 t.

Cette décision élimine l'incertitude qui planait pour la période après 1966 et met les producteurs en mesure de vendre jusqu'au début de la prochaine décennie des quantités déterminées, quoique limitées, à des prix connus, elle doit normalement éviter de fermer des mines ce qui aurait pu provoquer l'inondation des mines souterraines et des pertes notables de réserves, et, par conséquent, encourager l'exploitation des minerais les plus riches et l'abandon des minerais de teneur marginale. En France on a pu fermer de nombreuses mines sans mettre leur avenir en danger. Mais tout ceci montre bien l'étendue du paradoxe actuel des politiques sur les réserves de matériaux fissiles.

Donc au 1er janvier 1971 on aura extrait, malgré le rythme très réduit de l'extraction de 1967 à 1971 *la moitié* des réserves mises à jour depuis la guerre, ce que le rapport commente en écrivant : « les réserves actuellement connues seront très largement entamées au début de la prochaine décennie... précisément à l'époque où les augures situent généralement le point de départ d'une expansion de la production d'énergie d'origine nucléaire. On ne peut jamais affirmer qu'un gros gisement ne sera pas bientôt mis en évidence, encore qu'il n'y ait pas eu de découverte de districts miniers importants dans le monde depuis 1956 ». (Dans une communication au Congrès de Genève de septembre 1964, M. Bowie (3) rappelle même qu'à la fin de 1961 il a paru nécessaire après exécution de sondages en profondeur dans les gisements de réviser les estimations de réserves faites en 1958 en les diminuant de plus de 30 %). Les États-Unis ont procédé (4) en mai 1960 à une évaluation des réserves connues à faible teneur laissant de côté les réserves « d'espoir ». Il s'agit essentiellement de l'uranium de phosphates en Amérique du Nord (300 000 t) et en Afrique (900 000 t) des schistes de Suède (700 000 t), etc... au total environ 2 millions de tonnes exploitables à un prix double du prix actuel ce qui paraît encore acceptable mais le rapport conseille de traiter cet uranium « potentiel » avec une extrême circonspection, il paraît « beaucoup moins utopique de fonder les perspectives d'avenir sur de nouvelles découvertes plutôt que sur la mise en valeur très aléatoire de ces gisements pauvres ».

Le prix de revient de l'uranium extrait varie très exactement en raison inverse de sa teneur (entre 5,5 et 8 dollars la livre d'oxyde pour 1 % de teneur). Or, les frais de recherches et de prospection sont de l'ordre de 1 à 2 dollars pour la même unité, aussi il n'y a pas lieu pour le moment devant ces chiffres d'exploiter des gisements à faible teneur et il y a intérêt à entreprendre des recherches.

3. Évolution de 1971 a 1980

La consommation d'uranium entre 1970 et 1980 dépend essentiellement de la puissance nucléaire à installer dans le même laps de temps, les besoins militaires éventuels

(3) *Uranium and thorium ore reserves and potentiel rapport*, n° 164, S. H. U. Bowie Great-Britain — Troisième conference internationale sur les usages pacifiques de l'énergie nucléaire, septembre 1964, Genève (Suisse).

(4) *Energy from Uranium and Coal Reserves U. S. A. E. C.*, T. I. D. 82.07.

étant supposés couverts par les stocks cumulés par les pays avant 1970, hypothèse assez précaire évidemment. Des évaluations assez différentes de la puissance nucléaire future ont été faites par divers organismes. L'essentiel est de fixer un certain pourcentage de la puissance nouvelle installée totale nucléaire ou non. EURATOM adoptant les conclusions du « groupe inter-exécutif Énergie » des trois communautés européennes admet *un décuplement en 10 ans* de la puissance électrique nucléaire installée dans les six pays (Allemagne, Belgique, France, Italie, Luxembourg, Pays-Bas) passant ainsi de 3 500 à 4 000 MWe en 1970 à 30 000 à 40 000 MWe en 1980. Certes ceci ne correspond qu'à 25 % de l'ensemble des constructions nouvelles et paraît *a priori* réalisable mais si on se rappelle la loi du doublement en dix ans de la puissance électrique installée (nucléaire ou non) le décuplement nucléaire apparaît formidable. Il ne faut pas oublier que les Trois « Sages » (1) proposaient à la Communauté européenne en 1957 la construction avant la fin de 1967 d'installations nucléaires d'une puissance totale de 15 millions de kW, qu'au moment où ils écrivaient les programmes des 6 pays de la Communauté en prévoyaient six et qu'il en sera construit en fait en 1967 à peu près deux millions de kW.

Les proportions retenues par le rapport en dehors de celles d'EURATOM sont 30 % pour la Grande-Bretagne, 20 % pour les U. S. A. et le Canada, 10 % pour les autres pays ayant montré de l'intérêt pour le nucléaire (Japon, Brésil, Argentine, Inde, Afrique du Sud). Personnellement nous ajouterions aussi l'Espagne très active aujourd'hui en matière nucléaire. Au total ceci entraînerait 100 millions de kW nucléaires sur les 520 millions de puissance électrique totale à installer dans le monde libre entre 1970 et 1980. Si l'exemple des Trois Sages (5) rend prudent bien que l'avenir leur donner a probablement raison avec un peu de retard, on peut citer en sens inverse les erreurs allemandes récentes, de plus de 100 %, sur le développement de la consommation des produits pétroliers en Allemagne fédérale où une trop grande prudence a conduit ce pays aujourd'hui dans une situation difficile.

Le rapport admet que les U. S. A. utiliseront pour leurs réacteurs l'uranium enrichi, le Canada et la Grande-Bretagne l'uranium naturel (hypothèse douteuse depuis la parution du dernier livre Blanc anglais début 1964) et les autres pays y compris la Communauté pour moitié l'un, pour moitié l'autre.

En effet il existe, à l'heure actuelle, dans le monde en fonctionnement quasi industriel, deux grands types de réacteurs et deux seulement, l'un utilisant l'uranium naturel avec le graphite comme modérateur et le gaz carbonique comme caloporteur, l'autre un uranium un peu enrichi en isotope fissile U^{235} avec l'eau légère à la fois comme modérateur et caloporteur (99,3 % de l'uranium naturel est formé par U^{238} qui n'est pas fissile). L'usine de Pierrelatte en France a pour but de faire cet enrichissement pour des besoins militaires mais ceci conduit à des pourcentages très différents d'enrichissement, presque 100 % pour les besoins militaires, 1,5 à 2,5 % pour les besoins civils. Les principes de séparation restent cependant les mêmes.

Tous calculs faits, le tableau III tiré du même rapport permet la poursuite de la discussion.

Dans un récent texte de l'A. E. C. (23 juin 1964) (6) il est donné des estimations beaucoup plus optimistes. Pour les U. S. A. seuls : 6 000 à 7 000 MW de puissance installée en 1970, 68 000 à 100 000 en 1980, les besoins cumulés d'uranium en tonnes métriques

(5) Un objectif pour EURATOM rapport présenté par M. Louis Armand, Franz Etzel et Francesco Giordani, mai 1957.

(6) La lettre est reproduite dans le *Forum Memo* de juillet 1964, p. 21. L'interview citée plus loin du Dr Seaborg est dans *Nucleonics* de juillet 1964.

étant estimés de 140 000 à 200 000. Ceci suppose par mégawatt-électrique un premier investissement (y compris dépenses de séparation isotopique) de 1,2 à 1,8 tonne de métal d'uranium et une consommation annuelle de 0,15 à 0,25 pour un facteur de charge de 80 % des centrales. La valeur d'inventaire de ces tonnages d'uranium, séparation faite, varie de 3 à 4 *milliards* de dollars.

Tableau III — DÉCENNIE 1970-1980

	Puissance MWe installée		Besoins d'Uranium en tonnes métriques		
	en 1970	en 1980	en 1970	en 1980	cumulés 1970-1980
Europe	10 000	57 000	4 000	20 000	100 000
Amérique du Nord	6 000	49 000	3 000	14 000	70 000
Autres pays	1 000	11 000	1 000	4 000	20 000
	17 000	117 000	8 000	38 000	190 000

On peut avoir certaines inquiétudes sur la production de l'uranium enrichi nécessaire pour ce programme; les hypothèses nouvelles conduisent à traiter dans les usines de séparation isotopique près de 200 000 t d'uranium naturel pour les besoins cumulés de 1970-1980, ce qui correspond à un tonnage d'U^{235} dans l'uranium enrichi final de plus de 1 000 t, la consommation pour l'année 1980 seule étant de l'*ordre de 200 t.* Ce sont là des chiffres très élevés qu'il faut rapprocher des réponses données récemment par le Dr Seaborg, président de l'Atomic Energy Commission des U. S. A. aux industriels américains s'inquiétant de l'alimentation future des centrales en uranium enrichi. Il rappelle d'abord que le président Kennedy avait fixé un tonnage de 150 t d'U^{235} pour la distribution à l'étranger seule et que ceci correspond à l'alimentation à long terme d'une puissance de 5 000 MWe. Mais nous remarquerons que ceci n'est pas du tout de l'ordre de grandeur des besoins futurs, même hors des U. S. A., si les programmes ambitieux de vente des grandes firmes américaines se réalisent. Il rappelle aussi que, peu avant sa mort, le président Kennedy avait déclaré : « La capacité des U. S. A. à produire l'uranium enrichi est suffisante pour satisfaire à tous les besoins prévisibles pour les usages pacifiques en sus de nos besoins de défense », affirmation qui en fait refuse la discussion. En l'absence de chiffres officiels sur la production américaine des usines de séparation isotopique, on peut seulement rappeler (7) que la consommation d'énergie électrique de ces usines était de 53,7 TWh en 1957 et est maintenant ramenée à 26,6 TWh, ce sont des chiffres considérables. Si l'énergie électrique consommée en 1957 était produite nucléairement, il aurait été consommé pour cela seulement par les U. S. A. 1 350 t d'uranium contenant 10 t d'uranium enrichi, chiffres à rapprocher de ceux du tableau III. Il y a donc certainement un problème. Une solution au moins provisoire pourrait venir des militaires.

En effet, le rapport du directeur général de l'Agence internationale de l'Énergie atomique de Vienne (8) étudie (début 1964) en trois points les effets d'un accord général et complet de désarmement sur le développement de l'énergie nucléaire, celui-ci d'après cette étude entraînerait d'abord une augmentation de 40 000 à 60 000 du nombre des savants

(7) *Scientific American*, June 1964, p. 54 — Terawattheure soit un milliard de kilowatt/heure. La production d'énergie électrique totale nucléaire ou non de la France en 1965 dépassera légèrement 100 TWh. On a ainsi l'ordre de grandeur de l'énergie accumulée dans les stocks nucléaires.

(8) *Enormi potenziali umani materiali liberati dell'eventuale accordo di disarmo Atomo e industria*, 15 février 1964, p. 3.

et ingénieurs travaillant dans le monde (U. R. S. S. compris) dans le domaine des applications pacifiques grâce à l'utilisation de ceux occupés aujourd'hui aux applications militaires, ce qui apporterait une grande impulsion à tous les travaux en cours. Deuxième point : il ne faudrait pas trop compter sur l'apport de connaissances nouvelles par suppression du secret militaire, car cela porterait surtout dans le domaine des réacteurs transportables, et certains domaines de l'électronique, de la chimie, de la métallurgie. Troisième point : le résultat le plus important serait dans la mise à disposition des énormes stocks militaires de matière fissile. Le rapport estime que le stock mondial (U. R. S. S. compris) doit être de 2 000 à 3 000 t (U^{235} ou plutonium) (9) 2 000 t supposées libérées et employables sans déchet pour la production d'énergie nucléaire (ce qui nécessiterait de gros efforts pour le plutonium) permettraient d'après les chiffres mêmes de William Foster, délégué américain à la Conférence de désarmement, de produire 12 500 TWh, ce qui serait suffisant pour alimenter tous les programmes d'énergie électrique du monde entier d'ici 1980 (besoins français correspondants 500 TWh environ). Au point de vue technique une telle mise à disposition favoriserait les réacteurs à uranium enrichi vis-à-vis de ceux à uranium naturel que l'on cesserait peut-être temporairement de construire. Mais dès 1980 le problème de la discordance entre besoins et ressources se reposerait avec plus d'acuité qu'aujourd'hui, en face des 320 000 t toujours existantes dans cette hypothèse en 1980, nous aurions pour cette même année un besoin de 38 000 t et par suite des réserves pour seulement quelques années. Il semble donc que la distribution des stocks militaires, malgré leur importance, ne fasse pas gagner beaucoup plus de dix ans.

Revenons au cas hélas assez probable où les militaires ne viendraient pas à notre secours. Le tableau III ne traduit pas exactement la situation, car il faut tenir compte de la structure de l'industrie de l'uranium, par exemple, comme nous l'avons déjà écrit, la production dans les mines sud-africaines est liée à celle de l'or et elle ne peut dépasser, semble-t-il, 5 000 et 8 000 t par an, ce qui ne permet pas d'utiliser rapidement les 97 000 t de réserves. L'étude de détail de ces structures montre que pour cette décennie seulement 104 000 t pourront être fournies par les usines en service en 1970. 65 000 t devront provenir des usines à construire sur les gisements anciens et 21 000 t de gisements nouveaux et d'usines nouvelles. Il faut donc après 1975 mettre en service de nouveaux gisements. Comme il faut

Tableau IV — BESOINS ET RESSOURCES PAR CONTINENT (MONDE LIBRE)

(tonnes métriques)

	1970-1980		Besoins	Année 1980 Production possible réserves reconnues
	Besoins cumulés	Production possible sur réserves connues		
Europe	100 000	15 000	20 000	1 500
Amérique du Nord	70 000	154 000	14 000	11 000
Autres pays	30 000		4 000	8 000
	190 000	169 000	38 000	20 500

(9) Les matières fissiles les plus importantes sont aujourd'hui de loin U^{235} et divers plutoniums. L'U^{233} pourra jouer aussi un rôle si le thorium était utilisé. On nous excusera de ne pas nous étendre ici sur ces points. On trouvera quelques indications un peu plus loin.

Les 180 000 t d'uranium extrait dans le monde libre avant 1962 contenaient 1 260 t d'U^{235}, nous sommes donc bien dans l'ordre de grandeur.

au moins dix ans pour mettre en exploitation un gisement à partir du début de la prospection, il faut donc commencer tout de suite ou presque.

Les problèmes de l'Europe sont encore plus pressants. Le tableau IV le montre.

Certes l'Amérique pourrait exporter mais la disproportion des besoins et ressources pour l'Europe en 1980 reste éclatante. Le rapport craint d'ailleurs qu'une partie de gisements nouveaux soit découverte en Amérique et soit d'abord consacrée à couvrir la consommation du même continent.

En résumé, d'après ce rapport, le déséquilibre entre besoins et ressources se fera sentir plus fortement en Europe que partout ailleurs, dès 1975.

4. La situation des U. S. A. dans le très long terme

Un rapport officiel américain (10) avait, dès novembre 1962, attiré l'attention de l'opinion publique américaine sur les aspects du même problème à très long terme aux U. S. A. Il étudiait le problème sur une durée beaucoup plus longue que le rapport de l'EURATOM, débordant largement l'année 2000 et il nous paraît intéressant d'en résumer les principales lignes de raisonnement. Le président Kennedy avait en effet demandé en mars 1962 que l'on jette « a new and hard look at the role of nuclear power » et le rapport lui apportait des chiffres et des suggestions. Voici les chiffres : l'unité de réserve d'énergie sera ici le Q (10^{18} BTU ou 40 milliards de tonnes de charbon de bonne qualité).

L'énergie totale contenue dans les combustibles fossiles classiques aux U. S. A. est estimée, suivant les auteurs, à 30 Q ou 130 Q. En fait, tous admettent que 6 Q peuvent être extraits au prix actuel et avec la technologie actuelle, 25 Q supplémentaires à un prix plus élevé. On ne pourrait compter sur le reste car il correspondrait à des modifications très importantes de prix ou nécessiterait des découvertes extraordinaires en technologie.

Or la consommation totale d'énergie des U. S. A. supposée concentrée sur les combustibles fossiles aura atteint 6 Q vers l'an 2000 et 25 Q en 2050. Si on n'utilise pas d'autres sources d'énergie, les U. S. A. auront donc épuisé leurs réserves fossiles à bas prix d'ici 75 à 100 ans et leurs réserves imaginables d'ici 150 à 200 ans, et le rapport ajoute que longtemps avant cet épuisement, peut-être dans le cours de la vie de gens déjà en vie, des mesures devront être prises. Or les U. S. A. (6 % de la population mondiale) ont à leur disposition 30 % environ des réserves de combustibles fissiles, soit 5 fois leur part par habitant. Mais le reste du monde accroît sa consommation 2 à 3 fois plus vite que les U. S. A. Aussi, tenant compte de la croissance rapide de la technologie dans les pays en cours de développement, le rapport estime que les réserves en combustibles fossiles du monde (U. S. A. exclus) seront épuisées avant celle des U. S. A. Les U. S. A. ne peuvent donc attendre de l'extérieur aucune aide à long terme. Ils doivent résoudre eux-mêmes leur proche problème. La solution est bien évidemment dans l'énergie nucléaire.

Malheureusement, toute l'énergie que l'on peut obtenir dans les réacteurs nucléaires actuels à partir de tout l'uranium contenu dans les minerais U. S. A. connus et probables, est très nettement inférieure à un unique Q, compte tenu du plutonium produit.

Bien sûr, tout ceci repose d'abord sur la validité des hypothèses admises par la Commission américaine tant pour la consommation d'énergie totale (électrique et non électrique) que pour la détermination des réserves à prendre en compte. L'A. E. C. a examiné

(10) *Civilian Nuclear Power...* A report to the President, novembre 1962 (United States Atomic Energy Commission).

diverses lois de variations proposées par divers organismes et ceci nous paraît un bon exemple des méthodes que l'on peut employer pour ce genre de prévisions.

1° Une première loi de variation de la consommation énergétique totale extrapole l'expérience des 60 dernières années (doublement en 30 ans, bien noter qu'il s'agit de l'énergie totale électrique, sous toutes ses formes, ou autres). L'A. E. C. remarque que ceci est probablement prudent au moins pour les prochaines décades, car les accroissements du passé récent auraient été plus importants s'il n'y avait pas eu de fortes améliorations dans les rendements, et on ne peut espérer qu'elles se poursuivront dans l'avenir au même rythme.

2° Une deuxième loi de variation représentant la moyenne des informations fournies à l'A. E. C. par le ministère de l'Intérieur, correspond d'une part à un taux annuel de 1,75 % d'accroissement de la population (celui observé dans la dernière décade) et d'autre part à un taux annuel de 1,50 % d'accroissement de la consommation par tête (chiffre un peu plus élevé que celui de la dernière décade.)

3° La troisième loi de variation finalement adoptée par l'A. E. C. tient compte à la fois de la diminution du taux d'accroissement de la population observé depuis plus d'un siècle et d'une diminution du taux d'accroissement de la consommation par tête tendant à diviser ce taux par deux tous les 100 ans.

Le tableau VI est déduit des courbes données dans le rapport. L'échelle des Q s'y arrête à 500 Q : aussi, à partir de 2200 nous avons donné de chiffres que pour la troisième hypothèse, mais n'est-il pas remarquable qu'un rapport officiel ait l'audace de publier des prévisions pour 2300?

En fait, le rapport A. E. C. ne se préoccupe pas beaucoup de ce qui se passera après 2050 et il suffira donc de noter que si pour l'an 2000 les trois hypothèses donnent les mêmes résultats, en fait ceux-ci ne varient que du simple au double pour 2050, variation qui paraît normale si on se rappelle qu'une augmentation du simple au double équivaut à une avance de 30 ans avec les hypothèses admises.

Tableau V — ÉNERGIE TOTALE AUX U. S. A.

Consommation cumulée en Q
(le Q vaut 40 milliards de tonnes de bon charbon)

	1960	2000	2050	2100	2150	2200	2250	2300
1re hypothèse	1,6	4,5	13	35	100	—	—	—
2e hypothese	1,6	5	25	130	500	—	—	—
3e hypothese	1,6	4,7	17	40	80	140	200	300

5. La situation de la France

Les études françaises préparatoires sur l'énergie électrique ou sur l'énergie totale, pour les prochains plans quinquennaux, ne portent pas sur un aussi long terme que le rapport Kennedy mais vont jusqu'en 1985. Elles admettent une augmentation d'énergie électrique par doublement en 10 ans, chiffre classique résultant ici de prévisions sur l'évolution de la population et sur l'accroissement de la production intérieure brute. Le tableau VI donne les principaux résultats.

L'hydraulique s'obtient par la mise en chantier sur un rythme régulier des sites encore disponibles (on ne sera pas loin de l'épuisement en 1985). Le thermique « fatal » est formé par l'utilisation de combustibles pauvres, charbon non marchand, gaz de hauts

fourneaux, lignite. Par suite, le « complémentaire » devra être couvert par le charbon marchand, le fuel, le gaz naturel importé *ou le nucléaire*. Les 310 TWh complémentaires de 1985 demanderaient en combustible marchand 96 millions de tonnes soit beaucoup plus que la production française actuelle. De plus, si on prend en compte tous les besoins d'énergie

Tableau VI — ÉNERGIE ÉLECTRIQUE EN TWH (MILLIARDS DE KWH) FRANCE

TWh	1960	1965	1970	1975	1980	1985
Consommation	72	103	150	205	290	410
Importation	— 0,1	2	2	1	0	0
Hydraulique	40,3	43,5	51	59	64	70
Thermique « fatal »	20,9	26,1	28,4	29	29,5	30
Thermique « complementaire »	10,9	31,4	68,6	116	196,5	310

(électrique ou non), d'après le tableau VII, le déficit A entre la consommation et les ressources nationales atteindra en 1985 200 à 250 millions de tonnes d'équivalent charbon.

La place de l'énergie nucléaire en France est donc parfaitement marquée. Elle ne peut, pour le moment, jouer de rôle que dans la production de l'énergie électrique, mais si, grâce à elle, la production de l'énergie électrique est assurée, le problème des besoins totaux d'énergie en sera grandement facilité.

Tableau VII — BESOINS TOTAUX EN ÉNERGIE (FRANCE)
(millions de tonnes d'équivalent charbon)

Energie totale	1960	1970	1980	1985
Consommation A	130	190	275	330
Ressources nationales B	81,3	87,5	86–102	85–110
Couverture $\frac{B}{A}$ %	62,5	46	30 à 37	26 à 33

6. Problèmes économiques : compétitivité

Encore faut-il que les prix de revient le permettent, et nous ne pouvons éviter d'en dire quelques mots : sur ce sujet, depuis un an, tous les avis concordent : l'énergie nucléaire sera à bref délai compétitive, c'est-à-dire qu'un maître d'œuvre ayant à construire une centrale, et libre de ses mouvements, préférera la solution nucléaire à celle des combustibles classiques, et ceci indépendamment de toute politique générale, civile ou militaire. Pour la France, les progrès successifs sur la filière au graphite-gaz, à l'uranium naturel, entre EDF-1, EDF-2, EDF-3 sont considérables et tous ceux qui ont pu étudier les prix d'EDF-3 où presque toutes les commandes sont passées, et discuter les hypothèses d'exploitation, se sentent assurés que les prix des kWh nucléaire et classique seront à la mise en route d'EDF-3 sensiblement équivalents pour un taux d'actualisation de 7 %. Certes l'expérience doit confirmer les hypothèses faites, mais s'il y aura peut-être sur certains points des surprises dans le mauvais sens, il y en aura d'autres dans le bon sens, et ceci équilibrera cela. La tendance à

la diminution des coûts des centrales nucléaires est si fortement marquée que personne en France ne serait étonné si en 1985 le rapport des prix des kWh nucléaire et classique était tombé à 0,70, le nucléaire prendrait alors tout ce que l'on a appelé plus haut le thermique complémentaire.

Bien que la tendance soit incontestablement la même, il est plus difficile de porter un jugement sûr sur des filières américaines à uranium enrichi, les renseignements fournis étant souvent contradictoires. Ainsi le « report to the President de novembre 1962 » prévoyait pour 1970 un coût de 5,3 millièmes de dollar/kWh et pour 1980 3,8 millièmes de dollar/kWh; or d'une part en février 1964 la société de production d'electricité, Jersey Central Power, annonçait l'achat à la General Electric américaine d'un réacteur à uranium enrichi qui produirait l'énergie électrique vers 1967 au prix extraordinairement bas de 3,4 à 3,8 millièmes de dollar/kWh, d'autre part deux mois après (avril 64), la société de production d'electricité Niagara Mohawk annonçait à son tour l'achat d'un réacteur très voisin au même constructeur mais avec un prix d'energie nettement plus élevé de 6,7 millièmes de dollar/kWh. Sans rentrer dans les détails, indiquons simplement que la dépense en capital atteignait, dans des conditions à peu près comparables, 22 millions de dollars de plus dans le dernier cas (90 au lieu de 68). On s'est évertué depuis à donner, sur cette énorme divergence, des explications qui sont toujours restées partielles, aussi nous ne retiendrons que la déclaration ironique du représentant de Niagara : « Aucune de nos deux Sociétés ne sait ce que la centrale lui coûtera finalement : nous le saurons quand elles seront finies et à ce moment, croyez-moi, il n'y aura plus 22 millions de dollars de différence. »

Aussi la Commission mixte américaine (Sénat, Chambre des représentants) des affaires atomiques a demandé à un des hommes les plus respectés de l'industrie électrique américaine, Philip SPORN, d'essayer de démêler les raisons de ces prix bas mais si différents. Il vient (août 1964) de suggérer quatre facteurs : concurrence plus ou moins intense au moment de certaines réponses aux appels d'offres, prise en compte plus rapide que prévue au début des perfectionnements techniques, prix inférieurs à ceux prévus pour les parties classiques et traitement trop optimiste des diverses provisions pour aléas, etc. Il estime que 4,6 millièmes de dollar/kWh, chiffre nettement supérieur au premier avancé par Jersey Central Power, serait dans l'immédiat un prix raisonnable car ceci rend compétitif la centrale nucléaire avec une centrale classique brûlant du charbon à 27 cents/million de BTU (Jersey Central avait dit 20), ce qui est déjà très beau.

Sur le plan international la confusion est donc grande et il est impossible de prévoir qui l'emportera de l'uranium naturel ou de l'uranium enrichi, les conséquences dépassent de beaucoup celles d'une simple lutte concurrentielle, et on ne peut cependant s'empêcher de penser que les industriels américains nucléaires font en ce moment des efforts financiers considérables pour déformer le marché international afin de créer en fait un monopole pour la voie américaine des réacteurs à uranium.

Quoi qu'il en soit, pour l'une ou l'autre filière, le moment est proche où elles pourront affronter à armes égales la concurrence avec les moyens classiques de production. Les possibilités de l'énergie nucléaire seront donc, dans l'avenir utilisées à fond.

7. Quelques statistiques a l'échelle mondiale

Avant d'examiner dans une deuxième partie les solutions de cette discordance étonnante et imprévue entre besoins et ressources en matière nucléaire, il est bon, pensons-nous, d'évoquer quelques statistiques générales sur les autres formes d'énergie, comme nous

l'avons fait pour la France. Les ordres de grandeur du problème et l'importance de la solution nucléaire apparaîtront plus clairement. Un rapport très volumineux a été préparé aux U. S. A. par Mac Kinley (11) en octobre 1960 et publié par les soins du gouvernement américain.

C'est une source très précieuse de renseignements, en particulier sur le monde sino-soviétique. Le tableau VIII donne pour ce cas les réserves et les consommations annuelles d'énergie primaire en milliards de tonnes de charbon équivalent telles qu'on peut les prévoir pour l'an 2000.

Tableau VIII — RESSOURCES TOTALES EN ÉNERGIE

Milliards de tonnes de charbon équivalent	Monde sino-soviétique An 2000					
	Reserves			Consommation annuelle		
	U. R. S. S.	Satellites européens	Chine populaire	U. R. S. S.	Satellites	Chine populaire
Charbon	6 700	34	1 400	0,59	0,41	0,84
Schiste	17	—	22,5	0,02	—	—
Tourbe	54	—	—	0,02	—	—
Produits pétroliers	21,50	0,5	—	1,4	0,04	—
Gaz naturel	24,00	0,1	—	1,2	—	—
Énergie hydro-électrique	0,35	0,03	0,40	0,77*	0,016	0,040

(*) La comparaison du potentiel hydro-electrique (0,35) et de la production annuelle (0,77) n'est pas une erreur de frappe mais souligne la difficulté des études statistiques faites à partir des données U. R. S. S.

Le tableau IX présente le bilan global mondial pour les différentes grandes divisions du monde.

Pour une équivalence de 10 kg de charbon par gramme d'uranium (performance actuelle du graphite-gaz), les 450 000 t. de réserves de métal uranium du monde libre au 1er janvier 1962 équivalent aussi à 5 milliards de tonnes courtes de charbon équivalent, chiffre ridiculement faible par rapport aux réserves ci-dessus.

Tableau IX — RÉSERVES ACTUELLES ET CONSOMMATION ANNUELLE D'ÉNERGIE PRIMAIRE (charbon, produits pétroliers et gaz naturel)

Milliards de tonnes courtes (*) de charbon équivalent	Réserves			Consommation		
	Possibles	Probables	Connues	1960	1975	2000
Hémisphère occidental, U. S. A., Canada, etc.	3 127	521	291	2,03	3,69	7,66
Europe occidentale et Afrique du Nord	634	330	168	0,86	1,13	2,27
Moyen-Orient	640	176	52	0,033	0,066	0,11
Reste du monde libre (**)	538	0,85	77	0,29	0,48	1,33
Total monde libre	4 939	2 012	588	3,22	5,37	11,37
Total monde soviétique	8 993	?	399	1,39	3,37	5,49
TOTAL GÉNÉRAL	13 932	?	987	4,61	8,74	16,86

(*) Une tonne courte U. S. A. vaut 907,200 kg.
(**) La discordance dans cette ligne entre reserves probables (c'est-à-dire estimées exploitables dans des gisements connus) et possibles (y compris estimation de gisements encore à decouvrir) existe bien dans le rapport Mac Kinley.
(***) Le potentiel total hydro-électrique entièrement exploite donnerait pour le monde entier annuellement 5 milliards de tonnes (cinq).

(11) On trouvera aussi des renseignements du même ordre dans un article récent anonyme de la *Revue française de l'Énergie* (novembre 1963, pp. 48 à 60) intitulé : les développements pacifiques de l'énergie nucléaire. Ainsi la production de la Chine pour 1961 est évaluée à 480 millions de tonnes, chiffre compatible avec le chiffre ci-dessus pour l'an 2000.

Le monde libre a une consommation de combustibles classiques plus de deux fois celle du monde sino-soviétique, mais des réserves « possibles » à peine supérieures à la moitié de celui-ci. Cette infériorité semble être compensée par une supériorité pour les réserves de combustibles nucléaires (tableaux X). Or, on remarquera déjà bien des divergences en comparant les chiffres du monde « libre » avec ceux du rapport EURATOM; la production de 40 000 t. pour le monde libre correspondant évidemment à une année de pointe par exemple. Par ailleurs, il faut se rappeler que la rapport EURATOM ne tenait pas compte pour les problèmes à moyen terme des réserves à plus de 8 dollars la livre d'oxide.

Tableau X — RÉSERVES DE COMBUSTIBLES NUCLÉAIRES
(milliers de tonnes d'oxyde)

	URANIUM			Production annuelle 1960	THORIUM	
	Réserves				Réserves	
	10 $ livre	20 $ livre	50 $ livre		probables	connues
Monde libre	1 000	1 800	9 000	40	680	450
Monde sovietique	—	—	250 à 500	10 a 20	—	100?
Chine	—		20 a 100	?	—	—

Il faut évidemment rester très prudent devant ces chiffres à l'échelle mondiale, mais on peut cependant tirer de cette première partie de notre exposé la certitude, la nécessité de lancer rapidement d'audacieux programmes de recherches de combustibles nucléaires. Les gouvernements ne doivent pas rester frappés de tanathomanie (12). La deuxième partie vous apportera en effet une solution, mais à long terme, son influence ne pouvant se faire sentir sérieusement avant l'an 2000.

Deuxième partie

UNE SOLUTION APPORTÉE PAR LA TECHNIQUE : LES « SURGÉNÉRATEURS »

1. Convertisseurs et surgénérateurs

Le rapport au président Kennedy propose comme solution au dilemne besoins-ressources l'utilisation d'un nouveau type de réacteur, les « surgénérateurs ». Il nous permettra, écrit le rapport, d'utiliser, d'une part, cent fois mieux l'uranium et, d'autre part, le thorium au même titre que l'uranium. De plus, le coût d'extraction du minerai perdra de son importance dans le prix de revient final et on pourra utiliser d'énormes quantités de minerai à basse teneur. C'est plus de 100 000 Q qu'il faudra alors attribuer à l'uranium et autant, sinon plus, au thorium. Y a t-il eu jamais dans l'histoire économique des hommes une telle aventure et de tels espoirs?

Mais un peu de technique est nécessaire : quels sont ces « surgénérateurs » mystérieux qui forment une deuxième classe de réacteur nucléaire à côté des réacteurs actuels et que l'on appelle aux U. S. A. et au Royaume-Uni des « breeders » [de to breed (couver), on comprendra plus loin pourquoi].

(12) Fréquente chez les Esquimaux où des hommes meurent simplement parce qu'un autre homme leur a dit que cela allait arriver.

La première classe comprend essentiellement aujourd'hui tous les réacteurs actuellement en cours de développement industriel tels que les réacteurs du type américain à eau naturelle, ceux du type anglo-français (graphite refroidi au gaz carbonique). Leurs éléments combustibles utilisent, comme nous l'avons écrit plus haut) l'uranium soit faiblement enrichi pour le type américain (1,5 à 2,5 % suivant les cas), soit naturel pour le type graphite gaz. Ils produisent par leur fonctionnement de l'énergie électrique bien évidemment, mais aussi du plutonium que l'on sait récupérer quand on le désire dans des usines spéciales de retraitement. Ils « convertissent » donc de l'U^{238} pratiquement non fossile, en une matière fissile, le plutonium; mais comme ils utilisent pour la fission essentiellement des neutrons de vitesse modérée, ils ont aussi parfois le nom de réacteurs lents.

A côté de ces réacteurs industriellement au point aujourd'hui, il existe d'assez nombreux prototypes de filières différentes appartenant toujours à la classe précédente des convertisseurs, comme celles utilisant l'eau lourde. En France, par exemple, un réacteur de 80 MWe est en construction à Brennilis en Bretagne. Les deux avantages techniques essentiels dus aux excellentes qualités nucléaires de l'eau lourde sont les suivants :

a) EL-4 doit permettre de tirer trois fois plus d'énergie d'un même poids d'uranium naturel que par les voies graphite-gaz ou eau naturelle. En cas de pénurie d'uranium, cette voie à eau lourde peut se montrer très précieuse. En tout cas le prix de revient sera moins sensible aux augmentations du prix de l'uranium.

(*b* La puissance par unité de volume promet d'être élevée (cinq fois plus que le graphite-gaz pour EL-4 que pour EDF-3), ce qui permet d'espérer pour les grandes puissances unitaires des prix d'investissement bas, par diminution de volume du réacteur, donc de son enceinte. Le nombre de canaux est aussi trés réduit, ce qui entraîne une diminution du nombre des organes de réglage ou de contrôle .

La voie nouvelle ouverte par EL-4 répond donc bien aux conditions posées par le milieu économique. On peut espérer pouvoir engager une première centrale de cette voie nouvelle vers la fin du Ve Plan, donc vers 1968, avec mise en route en 1972. C'est donc seulement à cette époque que l'on aura une expérience suffisante pour décider de l'emploi massif de cette nouvelle voie. Seule l'expérience d'exploitation permettra en effet de dire si le prix de l'énergie ainsi obtenue sera plus bas, comme nous l'espérons, que celui de la voie graphite-gaz. Mais il y a de bonnes chances, et ainsi la voie à eau lourde pourra sans doute relayer, si c'est nécessaire ou utile, la voie graphite-gaz dans dix ans et jusqu'à l'arrivée des surgénérateurs. Ainsi la France ne dépendra pas, pour les années à venir, d'une seule voie, ce qui comporte toujours un risque, et même si pour l'eau lourde un autre fluide refroidisseur se montrait supérieur au gaz carbonique, la somme d'expériences recueillies par EL-4 nous placerait, vis-à-vis des autres puissances atomiques, dans une position encore très acceptable.

Le deuxième type existe aujourd'hui sous forme de prototypes, soit en essais (U. S. A., Grande-Bretagne et Russie), soit en construction (France : Rapsodie à Cadarache). Ce type de réacteur est prévu pour consommer essentiellement du plutonium. Ils utilisent, pour la plupart, pour des raisons de physique nucléaire et de tecnologie, des neutrons de grande vitesse. On leur donne alors le nom de rapides, mais il ne faut pas faire la confusion car on peut faire, au moins en théorie, des « surgénérateurs » avec des réacteurs à neutrons lents et des convertisseurs avec des réacteurs à neutrons rapides. Cette utilisation de plutonium par les surgénérateurs se fait d'ailleurs dans des conditions extraordinaires, car même pour les premiers réacteurs de caractère industriel la production du plutonium sera supérieure

à celle nécessaire pour reconstituer une nouvelle charge et continuer l'exploitation sans apport nouveau de matière fissile. On dispose donc à chaque déchargement, d'un surplus net de plutonium qui pourra contribuer à la première charge d'un autre réacteur du même type. En d'autres termes, Ils convertissent de l'uranium non fissile en plutonium avec un tel succès que l'on retrouve après une première production d'énergie électrique dans les combustibles usés, non seulement assez de plutonium pour remplacer les matières fissiles brûlées pour engendrer l'énergie électrique dans le premier passage, mais un surplus. Ce mécanisme ne s'arrête au moins en théorie, qu'avec la disparition de l'uranium non fissile; on peut ainsi envisager de transformer tout l'uranium naturel en énergie. On comprend pourquoi on les appelle « surgénérateurs ». En décembre 1963, l'A. E. C. dévoilait son échéancier de recherches et développement de ce type de réacteur et se proposait l'année 1989 pour l'introduction industrielle à grande échelle en prévoyant d'ici là une dépense globale de un milliard de dollars.

Mais on ne saurait aller plus loin sans préciser le fonctionnement de cette économie « balancée » nucléaire utilisant à la fois les surgénérateurs et les convertisseurs car les premiers nécessitent pour se développer de grandes quantités de plutonium qu'ils ne sauraient produire seuls.

2. Économies balancées

Le rapport au président proposait cette solution de l'économie balancée mais ne donnait pratiquement aucun chiffre, il n'est donc pas possible, par sa seule lecture, de porter un jugement motivé sur le programme qu'il propose avant de connaître les résultats auxquels il pourrait aboutir. Tout un travail amorcé déjà par certaines publications a donc dû être entrepris.

Une économie balancée suppose pour la production d'énergie électrique les deux classes de réacteurs précédentes et suppose qu'il n'y a aucun échange de plutonium avec l'extérieur : tout le plutonium produit par chacune des 2 classes de réacteurs en surplus est utilisé pour les charges initiales des réacteurs surgénérateurs nouveaux. Ces matières fissiles consommées par les convertisseurs sont renouvelées par apport d'uranium naturel ou enrichi et celles consommées par les surgénérateurs par le plutonium présent dans les combustibles usés. L'U^{238} « converti » dans les surgénérateurs est compensé par un apport d'uranium apprauvri. On fournit donc le circuit économique de l'uranium naturel et on en sort de l'énergie électrique, la croissance même du système nécessaire pour répondre aux augmentations de consommation d'énergie étant ainsi auto-entretenue. Une équation exprimant l'absence d'échange de plutonium avec l'extérieur ou avec un stock va donc dominer le problème et ce sont les conséquences de cette liaison obligatoire entre les différentes données qui feront l'originalité de la solution. Nous nous bornerons ici à une analyse simplifiée.

Commençons par supposer que le plutonium soit produit instantanément, dès son introduction dans le réacteur, et réutilisable immédiatement et parfaitement, donc qu'il n'y ait ni de délais ni pertes. Notons à l'instant t en mégawatt électrique (MWe).

N (t) puissance totale nucléaire en service,
T (t) puissance installée en convertisseurs,
F (t) puissance installée en surgénérateurs.

Évidemment, $N(t) = T(t) + F(t)$

Trois paramètres vont, dans cette analyse simplifiée, caractériser les données physiques de l'économie nucléaire comprenant à la fois les deux types de réacteurs :

1) Production de plutonium fissile *nette* d'un convertisseur en kg par MWe et par an, c'est-à-dire le total du plutonium présent dans le combustible usé . . . . C_1
2) Production de plutonium fissile *nette* d'un surgénérateur en kg par MWe et par an, c'est-à-dire après reconstitution des éléments fissiles brûlés dans le réacteur . C_2
3) Charge initiale en plutonium d'un surgénérateur en kg par MWe, y compris les divers « inventaires » nécessaires dans le cycle tout entier en particulier dans les usines de retraitement des éléments combustibles usés ou de fabrication d'éléments combustibles neufs. . . . . S

Le tableau XI donne les valeurs que nous avons pu recueillir pour C_1, C_2 et S.

La dernière ligne type VZ correspond aux espoirs français les plus récents (13) Tous les autres chiffres ont été recueillis en 1962 ou 1963. On remarquera leur diversité.

Tableau XI — CONVERTISSEURS ET SURGÉNÉRATEURS

	C_1	C_2	S
Convertisseurs et surgenérateurs (sodium Atomics International (AI).	0,125	0,110	3,0
Réacteurs bouillants (General Electric) (GE)	0,260	0,134	2,1
Graphite-gaz et rapide envisagés par l'EURATOM			
en 1962	0,60	0,10	10,0
en 1963	0,47	0,30	4,0
Graphite-gaz et rapide envisages par la Grande-Bretagne. . . .	0,60	—	2,5
Rapide envisagé en France			
Type « A » (1963) (*)	—	0,28	3,8 à 4,8
Type « B » (1963) (*)	—	0,42	3,5 à 4,2
Type « VZ » (1964).		0,42	3,19

(*) Dans les types « A » et « B », les deux valeurs de S correspondent a deux taux de combustion différents 5 % et 10 %, la plus petite valeur etant pour le taux le plus éleve.

A partir de l'instant t, pendant le temps dt, les charges initiales de réacteurs rapides mis *en route* (puissance dF) demandent une quantité de plutonium (inventaires compris) S dF. Pendant la même durée, et par unité de temps, chaque unité de puissance *en marche* des thermiques apporte *net* C_1 kg de plutonium et chaque unité de puissance *en marche* de rapides apporte *net* C_2, ceci en sus du plutonium consommé par le même réacteur (C_2 positif définit la surgénération). L'équation exprimant qu'il n'y a ni formation, ni utilisation de stock est donc :

$$S \frac{dF(t)}{dt} = C_1 T(t) + C_2 F(t) \qquad \text{(I)}$$

équation qui peut s'écrire en éliminant T (t) :

$$S \frac{dF(t)}{dt} = C_1 N(t) - (C_1 - C_2) F(t) \qquad \text{(II)}$$

Cette équation d'équilibre entre production et consommation du plutonium définit la croissance des surgénérateurs.

Admettons, pour obtenir des résultats suffisamment généraux, que la puissance nucléaire totale N (t) varie exponentiellement suivant une formule telle que $N(t) = N(o)\, e^{\lambda t}$. On sait que depuis de nombreuses décennies la puissance électrique installée suit presque parfaitement cette loi dans tous les pays du Monde, avec un doublement en dix ans ($\lambda = 0{,}07$).

(13) Études préliminaires conduisant à un concept de réacteur à neutrons rapides de 1 000 MWe par MM. Vendryes et Zaleski — Rapport n° 41. Troisième conférence de Genève sur les applications pacifiques de l'énergie atomique, septembre 1964.

Ce modèle exponentiel est d'ailleurs très général car nous sommes maîtres de choisir λ lentement variable ce qui revient à remplacer les courbes de croissance par la suite de certaines de leurs tangentes, étant entendu que les courbes de variation de N (t) sont représentées en portant la puissance en coordonnées logarithmiques, λ taux de croissance est la pente de chaque tangente. Ici nous garderons λ constant. L'équation (II) donne immédiatement une des solutions correspondant au problème.

$$\frac{F}{N_0} = P_0 \left(e^{\lambda t} - e^{-\beta t}\right) + F_0 e^{-\beta t} \text{ avec } \beta = \frac{C_1 - C_2}{S} \qquad \text{(III)}$$

avec : $$p_0 = \frac{C_1}{C_1 - C_2 + \lambda S}$$

p^0 est le pourcentage limite de la puissance en rapides rapporté à la puissance nucléaire totale, c'est le taux de pénétration.

L'équation définissant p (t) taux de pénétration à l'instant t est évidemment :

$$\frac{dp}{dt} + \left(\frac{C_1 - C_2}{S} + \lambda\right) p = \frac{C_1}{S}$$

on aura : $p = p_0 \left(1 - e^{-(\lambda + \beta)t}\right) + F_0 e^{-(\lambda + \beta)t}$.

F_0 étant la valeur à l'instant zéro de la puissance installée en rapides. Sous réserve que $\beta < \lambda$ soit $\frac{C_2 - C_1}{S} < \lambda$, c'est-à-dire que la croissance soit suffisamment rapide, la proportion de rapides dans le nucléaire total tendra vers une limite égale à p_0 et cette limite sera inférieure à l'unité comme il convient si $\lambda > \frac{C_2}{S}$.

Si la condition précédente n'était pas remplie, le système ne serait pas *stable* car une faible variation de p autour de la solution respectant la condition d'équilibre grandirait indéfinivement, elle satisferait en effet à l'équation différentielle :

$$\frac{d\delta p}{dt} + k\delta p = 0 \text{ avec } k \text{ négatif}$$

Les deux notions d'existence d'une limite p_0 et de stabilité dans le cours du temps sont donc liées.

Par contre, la stabilité de la puissance en rapides exige $C_1 > C_2$, condition plus dure pour le convertisseur que la précédente, ($C_1 > C_2 + \lambda\delta$), car dans le premier cas les écarts peuvent devenir, par suite des exponentielles, infiniment grands en valeur absolue tout en étant infiniment petits en valeur relative par rapport à la variable principale.

En fait, la discussion des conditions de validité de cette proportion limite est assez délicate, car il faut savoir aussi si à un moment quelconque F (t) n'est pas devenu égal à N (t) chassant les convertisseurs et formant ainsi une économie nucléaire à un seul type de réacteur.

Nous avons discuté cela dans divers articles (14), tout au long des années 1963 et 1964.

(14) Faut-il sacrifier au futur le présent et l'avenir proche de l'énergie nucléaire, R. Gibrat, *Revue française de l'Énergie*, juin 1963.

L'économie énergétique nucléaire à long terme, R. Gibrat, *Énergie nucléaire*, octobre, novembre, décembre 1963.

Facteurs essentiels d'une économie nucléaire balancée, R. Gibrat, Troisième conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique, rappotr n° 99, Genève (Suisse), 31 août—9 septembre 1964.

Pertes de matières fissiles, immobilisations dans les inventaires, délais de retraitement et fabrication, facteurs essentiels de la future économie nucléaire, R. Gibrat, Conférence mondiale de l'énergie, Lausanne (Suisse), septembre 1964.

Stabilité des ensembles de convertisseurs et et surgénérateurs nucléaires R. Gibrat. Comptes rendus à l'académie des Sciences (en cours de parution).

Nous y avons montré, pour une situation technique caractérisée par les paramètres C_1, C_2, S et une situation économique définie par λ, qu'il existe, suivant les valeurs des paramètres, soit une économie *pure* de surgénérateurs produisant un excès de plutonium ou utilisant du plutonium extérieur, soit une économie où tous les réacteurs nouveaux sont des surgénérateurs, soit enfin une économie balancée de *durée limitée* débouchant au bout d'un temps plus ou moins long sur une économie balancée comprenant indéfiniment les deux types. Tout cela apparaît normal. L'intérêt est dans la formulation des conditions pour une économie balancée infinie.

Premier cas : $C_1 > C_2$, il faut alors que $\lambda S > C_1 - (C_1 - C_2) F_0$

Deuxième cas : $C_1 < C_2$, il faut alors que $\lambda S > C_2$.

Les deux diagrammes suivants l'expriment graphiquement.

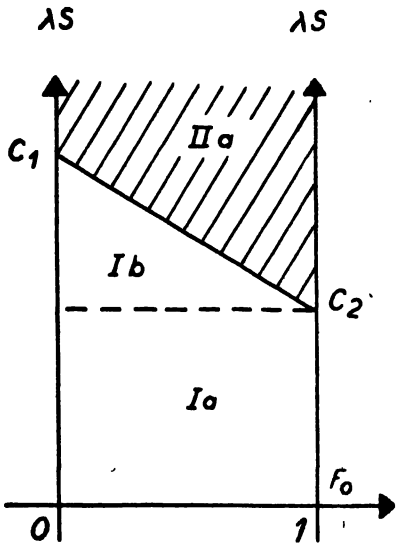

Diagramme A : $C_1 > C_2$

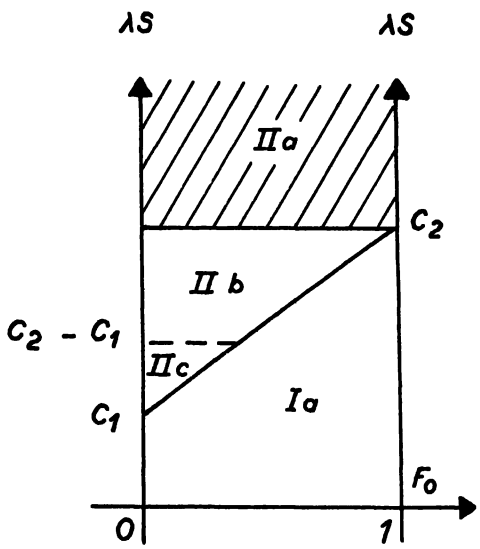

Diagramme B : $C_2 > C_1$

a et I *b* correspondent à une économie nouvelle formée de surgénérateurs avec constitution de stock de plutonium ou au contraire apport de l'extérieur — II *c* et II *b* économies balancées de durée limitée — II *a* économie balancée permanente.

Si nous revenons au taux limite de pénétration *p*, la formule II donne les chiffres du tableau XII pour différents taux de croissance λ correspondant à une multiplication du

Tableau XII — ÉCONOMIE BALANCÉE

(sans délais ni pertes)

	Taux de penétration p_0 pour les valeurs de λ			
	0,07	0,14	0,21	0,28
AI	0,56	0,29	0,19	0,15
GEC°	0,95	0,62	0,46	0,36
EURATOM 1962	0,50	0,31	0,23	0,18
EURATOM 1963	[1,02]	0,64	0,46	0,36

nucléaire en 10 ans par 2, 4, 8 ou 16 fois (à titre d'exemple, nous avons vu qu'EURATOM considère comme probable que le nucléaire décuplera entre 1970 et 1980 et le rapport au président admet pour les U. S. A. le même décuplement de 1965 à 1975).

Nous avons mis entre crochets la valeur pour $\lambda = 0{,}07$ dans le cas EURATUM 1963, car dépassant l'unité, elle n'a pas de sens immédiat, car ces données ne permettent pas de rester indéfiniment dans une économie balancée à 2 types de réacteur et au bout d'un certain temps, les thermiques ont disparu ($C_2 > \lambda S$ est ici satisfait).

Une première conséquence de l'équitation d'équilibre du plutonium dans une économie balancée est ainsi mise en évidence : *les surgénérateurs ont d'autant plus de difficultés à prendre une part dans le nucléaire que le taux de croissance du nucléaire total est élus élevé.* Par contre, nous avons démontré dans nos articles (1) que le temps t_0 nécessaire pour atteindre pratiquement cette limite décroît très vite quand λ croît, car pour atteindre 95 % de la limite dans le cas $F_0 = 0$, on a :

$$t_0 = \frac{3\,S}{C_1 - C_2 + \lambda S}$$

Nous n'insisterons pas ici.

3. Introduction d'un délai ν

En fait, il faut un certain délai ν entre la mise en route d'un réacteur rapide ou non et le moment où on peut disposer d'éléments de combustibles contenant le plutonium récupéré. Car il faut du temps, d'abord pour irradier un élément combustible dans le réacteur et fabriquer du plutonium en quantité suffisante puis, après déchargement, du temps pour le traiter dans une usine spéciale dite de retraitement, ceci d'autant plus qu'il est, à la sortie du réacteur, trop « chaud » au sens radio-actif et qu'il faut le laisser se « refroidir » de longs mois, enfin du temps quand on a ainsi isolé le plutonium pour fabriquer de nouveaux éléments combustibles. Le temps global est de l'ordre de *3 ans.* Il faut donc en tenir compte, car pendant ce temps la puissance réclamée a continué à croître. Cette équation existe déjà dans une étude de la General Electric Cy, et a été traitée sur machine mais sans faire l'objet d'un examen mathématique (15).

L'équation (I *bis*) devient ainsi :

$$S\,\frac{dF\,(t+\nu)}{dt} = C_1\,N\,(t) - (C_1 - C_2)\,F\,(t) \qquad (\text{I } bis)$$

puisque le déchargement d'un réacteur en t donne des éléments de combustibles utilisables pour la charge initiale à l'instant $(t + \nu)$.

Nous avons étudié très soigneusement les propriétés de cette équation sans les références déjà citées. Indiquons simplement que la limite p_0 devient :

$$p = \frac{C_1}{C_1 - C_2 + \lambda e^{\lambda\nu} S} \qquad (\text{III } bis)$$

L'influence du retard ν se traduit par la transformation de λ enn $e^{\lambda\nu}$ ce qui diminue très sensiblement pour les grands taux de croissance les valeurs du taux de pénétration. Le tableau XIII modifiant le tableau XII, suppose pour ν la valeur de la GEc°, c'est-à-dire 3 années.

(15) Cohen K., Zebrodski E., Uranium utilization in the Twentieth Century, Atomic Industrial Forum, session novembre 1962.

Pour $\lambda = 0{,}21$ un peu inférieur au décuplement en 10 ans prévu à la fois par AI et EURATOM, le taux de pénétration limite est la moitié seulement du taux calculé sans délais. Le rôle du délai est donc fondamental.

Nous avons pu ainsi démontrer que nos diagrammes légèrement modifiés permettent toujours de représenter les divers types d'économie. Rien d'essentiellement nouveau n'apparaît ici, certaines limites des diagrammes au lieu d'être des droites deviennent des courbes, mais ce ne sont là que des détails. Signalons cependant que les problèmes de stabilité prennent une autre tournure, mais ceci devient trop spécialisé pour que nous en traitions ici.

Tableau XIII — ÉCONOMIE BALANCÉE
introduction d'un délai ν

	Taux de penétration p_1 pour les valeurs de λ			
	0,07	0,14	0,21	0,28
AI	0,46	0,19	0,10	0,06
CEGO	0,85	0,44	0,27	0,17
EURATOM 1962	0,44	0,22	0,13	0,09
EURATOM 1963	0,91	0,46	0,27	0,17

4. Introduction des divers délais et pertes

L'analyse ci-dessus du problème nous a paru peu à peu insuffisante et nous avons introduit finalement au lieu de ν, quatres nouveaux paramétres : a durée de séjour, δ délai avant déchargement, ε durée de traitement et k le coefficient de pertes. Les équations se compliquent. On trouvera une première partie de nos travaux dans nos rapports au Congrès mondial de l'énergie de Lausanne et à la Troisième conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques de Genève (septembre 1964). Les résultats accentuent encore l'importance des délais et pertes sur le taux limite de pénétration. Donnons simplement la nouvelle formule pour p.

$$p = \frac{C_1}{C_1 - C_2 + R\left[\left(\lambda e^{\lambda\delta} + \frac{1}{a}\right)\frac{e^{\lambda\varepsilon}}{1-k} - \frac{1}{a}\right]}$$

Le coefficient λ de l'analyse simplifiée, qui avec un seul retard ν était devenu $\lambda e^{\nu\lambda}$, est remplacé maintenant par une fonction compliquée de λ, δ, ε, a et k. Le tableau XIV donne les valeurs de p pour les réacteurs A, B et VZ et différents taux de pertes.

Trois hypothèses : s ni délais, ni pertes

f délais (a, δ, ε) pertes faibles 2,7 % (sauf pour VZ où nous avons pris 2 %)

F délais (a, δ, ε) mais pertes fortes (15 %).

Tableau XIV — TAUX DE PÉNÉTRATION LIMITE

Valeurs de λ	Réacteur « A »			Reacteur « B »			Reacteur « VZ »	
	s	f	F	s	f	F	s	f
0,00	—	—	0,90	—	—	—	—	—
0,07	0,89	0,72	0,48	—	—	0,89	—	—
0,14	0,55	0,44	0,32	0,89	0,59	0,47	0,95	0,718
0,21	0,39	0,29	0,22	0,62	0,35	0,28	0,65	0,44
0,28	0,30	0,21	0,12	0,47	0,22	0,18	0,50	0,30

L'absence de chiffres dans le tableau XIV correspond à des valeurs calculées de p supérieures à l'unité, donc au cas $C_2 > \lambda S$; il ne peut y avoir là d'économie balancée permanente. On voit dans la première ligne ($\lambda = 0{,}00$) que le réacteur surgénérateur AF est le seul à réclamer dans une économie électrique stagnante le concours des convertisseurs, cela est dû au fait que, malgré la surgénération de principe, délais et pertes ramènent sa production nette au-dessus de zéro. L'influence de ces délais et pertes apparaît aussi clairement dans la diminution des valeurs de p quand on passe des hypothèses s à f et de f à F. Pour les décuplements en 10 ans (λ un peu inférieur à 0,21) on voit que les rapides ne conquièrent que 22 % du marché pour AF, mais pour VZ on arrive avec les pertes prévues de 2 % à 44 %, ce qui est très satisfaisant.

Le taux de croissance λ_0 d'auto-entretien, c'est-à-dire lorsque les surgénérateurs satisfont seuls pleinement à la demande d'énergie électrique, est pour le réacteur français, le plus prometteur, VZ, compte tenu des divers délais et pertes 10,3 %, une analyse sommaire lui attribuerait un taux $\frac{C_2}{R}$ de 18,7 %. Ceci montre mieux que tout autre raisonnement l'importance des délais et pertes.

Ces formules permettent d'évaluer l'importance, pour la future économie nucléaire des divers facteurs et ainsi de doser les différents efforts. Ainsi dans un cas précis, nous avons pu démontrer que faire varier la production nette de plutonium d'un surgénérateur de 10 %, équivaut, si on veut garder constant le taux de pénétration d'un surgénérateur dans une économie nucléaire donnée.

à augmenter la durée de séjour de la charge de onze mois,
ou à diminuer la durée de mise en équilibre neutronique de deux mois,
ou à diminuer la durée de retraitement, de fabrication, etc., d'un mois,
ou à diminuer le pourcentage des pertes par cycle de 2 %,
ou à chercher le même taux de pénétration pour un taux de croissance plus bas de 4,2 %.

5. Économie de ressources naturelles

Le rapport au président ne présentait pas de chiffres, avons-nous dit, et l'examen d'une première étude présentée ausitôt après sa diffusion par l'Atomic International (16) nous conduisait à des réflexions très peu satisfaisantes et paraissait détruire presque entièrement tous les espoirs soulevés par le rapport au président. L'examen détaillé de cette étude sur une économie nucléaire du type convertisseurs à neutrons lents et surgénérateurs à neutrons rapides (modèle dit BNE) montrait que pour cette étude particulière une économie énergétique utilisant des « surgénérateurs » n'apportait sur une économie ne les utilisant pas (modèle MRE) que des avantages très faibles, au moins jusqu'à l'an 2025.

Un seul exemple suffira : la fission de tout l'U^{235} existant dans un gramme d'oxyde d'uranium naturel donne théroriquement la même énergie que 18 kg de charbon de bonne qualité; si, grâce à la conversion des « surgénérateurs », on arrivait à convertir totalement l'U^{238}, on aurait par gramme d'oxyde l'équivalent de 2 400 kg de charbon. Compte tenu, d'une part de toutes les pertes subies dans les diverses extractions, préparations, fabrications diverses, d'autre part de la conversion en plutonium déjà effectuée dans les réacteurs actuels, le réacteur graphite-gaz actuel apporte dès aujourd'hui une équivalence, par gramme

(16) Golan S, Siegel S, Stoker D. J., Uranium utilization pattern based on sodium cooled — reactor p. 101, Session Atomic Industrial Forum, novembre 1962.

d'oxyde, de 10 kg de charbon environ. Or, l'étude de l'Atomic Industrial donne le coefficient d'équivalence du tableau XV pour la consommation à partir de 1960.

L'introduction des surgénérateurs, préparée dès aujourd'hui, se fait sentir légèrement en 2025 et ne sera réellement efficace, en ce qui concerne la conservation des ressources naturelles, qu'en 2050; et encore on sera alors terriblement loin de ce « presque tout » dont

Tableau XIV

Équivalence kg charbon par gramme d'oxyde d'uranium	2000	2025	2050
Économie des convertisseurs (modèle MRE). .	10,7	13,1	15,6
Économie mixte (convertisseurs et surgénérateurs) (modele BNE).	11,8	18,7	39,6

les surgénérateurs devaient faire usage d'après le rapport au président, car le presque tout c'est 2 400 kg/g.

Aussi, l'Atomic International, se rendant sans doute compte de ces résultats bien qu'il ne les mette pas en évidence, propose tout à fait à la fin de son étude, de produire le plutonium supplémentaire nécessaire aux surgénérateurs dans un type de convertisseur très différent, réacteur rapide alimenté en uranium très enrichi (17 % d'U^{235}) et calculé spécialement pour être un bon producteur de plutonium. L'économie balancée ne comporte plus alors de réacteurs lents et il n'y a plus que deux types de rapides, l'un à l'uranium fortement enrichi, l'autre au plutonium; nous appelons ce nouveau type d'économie nucléaire le BNE amélioré.

Le réacteur lent du modèle BNE — uranium faiblement enrichi (3,6 %) — donnait, par milliard de kilowatt/heures, une production nette de plutonium de 25 kg (EDF-3 fera environ 100 kg), le réacteur rapide du même modèle BNE donnait 22 kg et le nouveau réacteur convertisseur « rapide » apportera 75 kg. Le BNE amélioré se rapproche donc beaucoup de l'économie balancée que nous aurions en Europe avec des convertisseurs au graphite-gaz et il donnera une meilleure idée de l'application brutale du rapport de l'A. E. C. aux conditions européennes. Il y aurait probablement de très sérieuses réserves à faire sur le plan technique ou économique en ce qui concerne la construction industrielle suffisamment proche de ce type de réacteur rapide convertisseur.

Le BNE amélioré se montre en tout cas très supérieur au BNE, car la proportion de réacteurs surgénérateurs est fortement augmentée et les convertisseurs disparaissent plus tôt, l'uranium appauvri des usines de diffusion joue alors son rôle; ainsi, le BNE amélioré demande-t-il seulement 2,3 millions de tonnes d'oxyde d'U_3O_8 pour produire les 961 000 milliards de kWh prévus d'ici 2050, au lieu des dix millions de tonnes pour seulement 505 000 milliards de kWh dans le cas du MRE, soit une utilisation des ressources naturelles environ dix fois meilleure. Nous commencions à respirer, car il devenait évident que les résultats du modèle AI étaient fortement influencés par un convertisseur mauvais producteu de plutonium. Certes, nous restions encore très loin du « presque tout » du rapport A. E. C., mais l'influence des surgénérateurs devenait très forte.

Les mauvais résultats pouvaient donc être dus en particulier à des valeurs trop prudentes pour les divers paramètres; mais il était bien difficile d'en avoir la certitude, l'étude, si complète soit-elle, ne couvrant, comme toutes les autres études américaines ou anglaises à notre disposition, que des cas particuliers ne permettant jamais de généralisations.

Aussi, avons nous bâti le modèle permettant d'analyser l'influence des divers paramètres. Il se prête très bien à la détermination des économies que peuvent apporter les surgénérateurs dans l'utilisation des ressources naturelles. La consommation d'oxyde d'uranium tiré de la mine comporte en économie balancée deux termes dus tous deux aux convertisseurs, l'un pour la constitution des charges initiales, l'autre pour la reconstitution de l'U^{235} brûlé. En effet, pour plus d'un siècle, il n'apparaît pas que nous ayons à tenir compte en économie balancée de l'alimentation des surgénérateurs car l'uranium appauvri des usines de séparation isotopiques y pourvoira largement.

La consommation à l'instant t est donc de la forme :

$$A_1 T(t) + A_2 \frac{dT}{dt}$$

T étant la puissance installée en convertisseurs.

Nous avons démontré que, pour notre modèle, la limite asymptotique du rapport de la consommation d'uranium dans une économie avec surgénérateurs (BNE) et de celle dans une économie sans génération (MRE) est égale à la différente entre l'unité et le taux de pénétration, le temps t_2 pour atteindre pratiquement cette limite est plus grand que t_0 (avec les données AI pour $\lambda = 0{,}21$, 17 ans au lieu de 14, et pour $\lambda = 0{,}07$, 57 ans au lieu de 40). Ces faibles taux pour des croissances très rapides de l'économie nucléaire totale sont ici encore dus à l'impossibilité, pour les surgénérateurs, de rentrer en force dans une économie par suite des liaisons obligatoires introduites par l'équation d'équilibre du plutonium. Au passage, nous ferons observer que ces diverses valeurs de t_0 ou de t_2, temps pour atteindre tel ou tel équilibre, fixent bien ce que nous aimons à appeler un « horizon » économique.

Au total pour un réacteur du type VZ (compte tenu de tous délais et pertes) la dépense d'uranium pour un décuplement en 10 ans (hypothèse EURATOM) serait réduit à 56 % de sa valeur s'il n'y avait pas de surgénérateur. Mais si le taux λ de croissance de puissance électrique ne dépassait pas 10,3 % par an correspondant à l'auto-entretien, la dépense en uranium *deviendrait nulle* après un temps certes non négligeable (15 à 20 ans) ce qui est tout simplement prodigieux, ceci étant valable jusqu'au moment où nous aurions épuisé l'uranium appauvri des usines de séparation isotopique.

***

On peut donc penser que la dépense en matières nucléaires pourra un jour être ramenée à zéro ou presque, telle sera notre conclusion.

R. GIBRAT

Professeur d'Électricité industrielle
à l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris

Un rapport anglais à Genève 64 a exprimé l'espoir que l'on puisse un jour extraire à un prix possible l'uranium contenu dans l'eau de mer (1 à 2 mg par litre) grâce à une absorption préférentielle par l'oxyde de titane. Bien des choses seraient alors changées....

DISCUSSION

M. Ullmo. — J'ai été très frappé des perspectives énergétiques que vous nous avez présentées, dont je peux dire qu'elles sont encore inconnues, même des techniciens. Elles vont nous forcer à repenser toute la politique de l'énergie pour la fin du siècle.

Lorsque le surgénérateur sera au point, avec un rendement multiplié par une centaine pour l'uranium, on pourra entreprendre de rechercher celui-ci dans des roches très communes, qui en fourniront une source indéfinie. Mais nous n'en sommes pas encore là.

M. Gibrat. — Je suis entièrement d'accord avec tout cela.

M. J.-J. Caumartin. — Quelles sont les perspectives d'utilisation industrielle de l'énergie résultant de la Fusion Nucléaire?

M. Gibrat. — Aucune idée d'ici l'an 2000. Les physiciens en sont encore aux recherches fondamentales.

R. Remery. — En ce qui concerne le développement des besoins, dont dépendent les perspectives de risque de pénurie relative aux années 1980-90, n'a-t-on pas fait intervenir d'autres hypothèses que celles classiques, telle que le doublement en dix ans pour l'énergie électrique? Les conséquences de variation pour de telles hypothèses semblent a priori importantes. Il paraît difficile d'extrapoler brutalement pour les prochaines décades de la même façon pour la France, l'Amérique du Nord, l'Afrique et l'Asie. On imaginerait volontiers qu'il puisse y avoir une certaine accélération pour des pays actuellement très faibles consommateurs, et à l'inverse un freinage pour les pays en tête du progrès.

M. Gibrat. — Pour le moment les variations de consommation suivent en gros la même loi dans tous les pays; elles augmentent même souvent plus vite dans les pays en cours de développement.