

Aspects économiques de l'énergie nucléaire

Autor(en): **Haller, Pierre de**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Revue économique et sociale : bulletin de la Société d'Etudes Economiques et Sociales**

Band (Jahr): **14 (1956)**

Heft 3

PDF erstellt am: **10.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-134703>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Aspects économiques de l'énergie nucléaire

par Pierre DE HALLER,

*chargé de cours à l'École polytechnique fédérale à Zurich,
directeur des laboratoires de recherches de la maison Sulzer Frères S. A.,
à Winterthour*

A. Bases techniques de l'énergie nucléaire

On entend souvent exprimer l'opinion que la découverte de la fission nucléaire ouvre une période nouvelle de la civilisation : l'ère atomique. Cette découverte peut-elle révolutionner notre façon de vivre, changer la structure de notre industrie ? Permettra-t-elle de résoudre le problème tragique des régions sous-développées ? Ce sont là quelques-unes des questions que chacun se pose. A moins d'être prophète, il n'est pas possible d'y répondre, mais je voudrais essayer de donner quelques éléments concrets susceptibles d'aider à voir un peu plus clair dans le fouillis de renseignements et d'idées souvent fantaisistes publiés par la presse non spécialisée. Il est hors de doute que l'énergie nucléaire permet, par la concentration énorme de puissance qu'elle réalise, l'accomplissement de projets jusqu'ici utopiques : irrigation des déserts, extension des cultures dans les zones polaires, etc. Ces réalisations techniquement possibles sont-elles économiquement raisonnables, les avantages que l'on en tirerait sont-ils en proportion avec les investissements nécessaires ? Dans le domaine militaire, la question ne se pose jamais. Mais l'application pacifique et industrielle est dirigée par des lois différentes et très strictes, à la fois sur les plans technique et économique. Pour en juger, il est nécessaire de connaître les caractéristiques principales de cette nouvelle source d'énergie. Tout d'abord, rappelons ce que l'on entend par énergie : c'est le pouvoir de créer du travail, dont la forme élémentaire la plus immédiatement accessible est le soulèvement de poids. Cette énergie se présente sous des formes très différentes : électrique, mécanique, potentielle, cinétique, thermique, etc., toutes équivalentes.

On la mesure en diverses unités, un simple facteur numérique permet de passer de l'une à l'autre. Au début du siècle on a constaté que l'énergie n'était pas impondérable comme on le croyait jusqu'alors, mais qu'elle a une certaine masse et ceci a mené Einstein en 1905 à énoncer son principe de l'équivalence de la masse et de l'énergie, le facteur de transformation étant ici le carré de la vitesse de la lumière. L'énergie nucléaire, que l'on appelle improprement énergie atomique, est une création du xx^e siècle. Son début remonte à la découverte par Becquerel (1896) de la radioactivité naturelle de l'uranium et aux travaux de Pierre et Marie Curie sur le thorium, le polonium et surtout le radium. C'est Pierre Curie qui a montré en 1904 qu'un gramme de radium émettait en deux jours autant d'énergie qu'un gramme de charbon, mais avec cette différence essentielle que ce rayonnement paraissait se poursuivre indéfiniment, tandis que le charbon finit par se réduire en cendres.

Rutherford attribua ce rayonnement à une transmutation, au cours de laquelle un atome radioactif expulse des particules électrisées en se transformant en un atome d'un élément différent. Il a, en 1919, provoqué les premières désintégrations artificielles et a posé avec Bohr les bases de la conception moderne de l'atome. Les découvertes successives de l'électron positif, du neutron, de la radioactivité induite aboutissent à l'expérience fondamentale de Hahn et Strassmann en 1939, montrant que l'atome d'uranium bombardé par des neutrons pouvait se briser en deux fragments radioactifs au lieu de donner naissance comme on le supposait à un élément de nombre atomique voisin. Et c'est le début d'une activité fiévreuse parmi les savants, qui aboutit en 1942 à la construction par Fermi du premier réacteur nucléaire et en 1945 à la bombe de Hiroshima. Pour faire bien saisir la rapidité de ce développement, une comparaison s'impose : il s'est écoulé 100 ans entre la marmite de Papin et la machine à vapeur de Watt, 50 ans entre l'établissement des lois de l'induction par Faraday et le premier moteur électrique ; 12 ans ont suffi pour passer de l'expérience de laboratoire de Hertz à la première liaison radiotélégraphique, mais 3 ans seulement séparent la découverte de la fission de l'uranium et la pile de Chicago. Il me semble utile d'insister sur cette caractéristique de la science contemporaine ; les inventions se succèdent avec une rapidité telle qu'elles courent le risque d'être démodées

avant d'avoir pu être exploitées économiquement. Le facteur temps joue un rôle de plus en plus grand dans le développement et la recherche industriels.

Dans l'idée des anciens et jusqu'au début du xx^e siècle, l'atome constituait une particule élémentaire. La nature disposait de 92 « briques » pour construire tous les édifices matériels, minéraux, végétaux, animaux. On se représente actuellement l'atome comme étant constitué par un noyau chargé positivement où se trouve la presque totalité de la masse, et entouré d'un nuage de particules 1800 fois plus légères, chargées négativement, les électrons. Ces électrons sont responsables des propriétés chimiques des éléments, c'est pourquoi on classe ces derniers suivant le nombre de leurs électrons, dans le tableau de Mendeleïeff. Après avoir décomposé l'atome en un noyau où sa masse est concentrée et entourée d'électrons, on admet aujourd'hui que les noyaux sont eux-mêmes constitués par des particules plus petites, les *nucléons*, dont on connaît deux formes, l'une électrisée positivement, le *proton*, l'autre électriquement neutre, le *neutron*. Leur poids est de $1,67 \cdot 10^{-25}$ g., c'est-à-dire qu'il en faut 600.000 milliards de milliards pour faire un gramme de matière. Le nombre de protons fixe la charge électrique et par conséquent le nombre d'électrons, égal au numéro d'ordre de la table de Mendeleïeff, tandis que le poids atomique correspond au total des protons et des neutrons. On caractérisera donc un atome par deux chiffres, le nombre de protons et le nombre total de nucléons, par exemple ${}^1_1\text{H}$ désigne l'hydrogène, ${}^2_1\text{H}$ le deutérium, ${}^{238}_{92}\text{U}$ l'uranium, etc. Deux atomes ayant le même nombre de protons sont « isotopes », s'ils ont le même nombre de nucléons, ils sont « isobares ». Deux isotopes ayant par définition les mêmes propriétés chimiques sont très difficiles à séparer et leur fabrication est extrêmement coûteuse.

Le noyau de l'atome se compose donc d'un nombre entier de particules identiques. Son poids devrait donc être un multiple exact de celui du nucléon. Or les chimistes ont depuis longtemps constaté que ce n'était pas le cas, mais que les écarts entre le poids mesuré et le poids théorique s'alignaient assez bien sur une courbe présentant un maximum. L'explication de ce fait est donnée par la relation d'Einstein attribuant une masse à l'énergie. En effet, les nucléons sont agglomérés par des forces de nature encore mystérieuse, mais intenses, qui, au moment de la réunion des particules,

ont exercé un travail représentant une certaine masse. Ainsi cet écart entre les poids atomiques théorique et réel est directement proportionnel à l'énergie emmagasinée dans le noyau. Le fait que cet écart soit mesurable montre qu'il s'agit d'énergies énormes, étant donné la grandeur du facteur C^2 de proportionnalité. Dans une transmutation la différence entre les énergies de liaison doit s'échanger avec l'extérieur. Suivant le sens de la transmutation, il faut fournir du travail ou en absorber. La courbe (fig. 1) montre qu'il y a deux possibilités différentes (opposées) pour libérer de l'énergie nucléaire :

- a) combinaison de deux noyaux légers pour en former un plus lourd ;
- b) séparation d'un atome lourd en deux fragments plus légers.

Dans le premier cas on parle de fusion : elle fut réalisée en laboratoire en 1919 déjà par Rutherford, et rendue trop célèbre par les explosions des bombes dites à hydrogène. Le second cas est la fission (en particulier la fission de l'uranium) qui est pour le moment seule à être envisagée pour des applications techniques. Lors de cette fission, le noyau perd environ $1/1000$ de sa masse, c'est-à-dire qu'un kilo de matière peut dégager 25 millions de kWh. Il existe dans la nature un seul élément pour lequel cette désintégration peut être provoquée par des moyens assez simples et de façon qu'elle s'entretienne elle-même. Il s'agit de l'isotope 235 de l'uranium, composé de 92 protons et de 143 neutrons. Il se trouve dans la proportion de 0,7 % dans l'uranium naturel composé à 99,3 % de l'isotope 238. Il est intéressant de relever que ce sont des calculs théoriques qui ont permis d'attribuer la propriété de fission au seul isotope 235 avant que ce résultat ait pu être confirmé expérimentalement. On provoque la désintégration de l'uranium en le bombardant avec des neutrons. Le noyau de l' U^{235} est tellement peu stable que le choc suffit à le briser (fig. 2). Or, et c'est là un fait essentiel, cette rupture dégage, outre les deux fragments principaux, deux ou trois neutrons qui à leur tour peuvent provoquer une nouvelle fission et ainsi de suite. Si on utilise de l' U^{235} pur, chaque neutron émis est immédiatement capturé et la masse entière se désintègre en un instant. C'est ce qui se passe dans la bombe. Dans un réacteur industriel, on contrôle la réaction par divers moyens afin que la production d'énergie ne

dépasse pas la valeur désirée. Il se trouve que pour être aisément absorbés par l' U^{235} , les neutrons doivent être animés d'une vitesse relativement faible. Comme ils sont émis à grande vitesse, il faut donc les ralentir avant qu'ils ne s'échappent de l'enceinte. C'est le rôle du modérateur, composé de graphite, de béryllium ou d'eau lourde.

Au cours du ralentissement, le neutron passe par un niveau d'énergie pour lequel il est avidement absorbé par l' U^{238} , mais sans provoquer de fission (fig. 3). Il se forme alors un nouvel élément, le plutonium 239, qui n'existe qu'à l'état de traces non décelables dans la nature, et qui possède des propriétés analogues à celles de l' U^{235} ; il est en particulier fissile et peut être utilisé pour entretenir une réaction en chaîne. Il est donc en principe possible de transformer l' U^{238} , non fissile et par conséquent sans valeur, en un nouvel élément fissile. C'est ce qu'on appelle la conversion, et les réacteurs où cette transformation est particulièrement recherchée sont appelés convertisseurs ou régénérateurs, en anglais « breeders ». On a trouvé que le thorium 232, assez répandu sur la terre, est également fertile, c'est-à-dire qu'il se transforme par absorption d'un neutron en un isotope fissile, l' U^{233} . On dispose ainsi de trois éléments susceptibles d'être utilisés pour la production d'énergie. Un seul, U^{235} , se trouve dans la nature. Les deux autres ne peuvent être produits que dans une pile atomique. C'est dire que le point de départ de toute l'énergie nucléaire repose sur les 0,7 % d' U^{235} contenu dans l'uranium naturel. La pile de Chicago a montré que malgré cette faible teneur il était possible de maintenir une réaction en chaîne avec de l'uranium naturel. Il est clair cependant que la construction est grandement facilitée si l'on dispose d'un combustible contenant davantage de matière fissile. On a donc cherché à augmenter cette teneur en séparant les deux isotopes, ce qui est une opération excessivement difficile et coûteuse, réalisée à grande échelle à Oakridge. A titre d'indication, cette usine, qui produit environ 400 g. de U^{235} par jour, a coûté 500 millions de dollars et absorbe 240.000 kW. d'électricité. En fait, la production d'un gramme d'uranium 235 pur consomme presque autant d'énergie qu'il peut en fournir par sa fission, de sorte qu'on peut se demander où est le gain. C'est pourquoi on ne l'utilise sous forte concentration que dans les installations de propulsion où le faible volume est plus important que le rendement

économique, ou comme charge initiale d'un réacteur convertisseur qui ne demande pas d'autre appoint de matériaux fissibles. Le calcul d'un réacteur revient en principe à faire le bilan des neutrons (fig. 4). Un réacteur, quel que soit son but : recherches, production de plutonium ou d'énergie, comprend toujours les éléments suivants (fig. 5) :

1. le combustible, sous forme d'uranium naturel ou enrichi en matière fissible, en général des barres ou des plaques métalliques enfermées dans une gaine d'aluminium ou de zirconium ;
2. le modérateur : graphite pur, eau lourde, béryllium ;
3. le réfrigérant, destiné à évacuer la chaleur produite dans les barres d'uranium et à la transmettre à la machine thermique, turbine à vapeur ou à gaz ;
4. les organes de réglage, composés de barres de cadmium ou de base absorbant fortement les neutrons et qui pénètrent plus ou moins dans l'enceinte réactive ;
5. la protection contre les radiations : en général des couches de béton de 2-3 m. d'épaisseur, ou simplement d'eau, dans certains réacteurs de recherche.

Les matériaux utilisés dans la construction des réacteurs doivent satisfaire à des prescriptions très sévères. Par exemple le modérateur ne devra pas contenir plus de 1 ‰ d'impuretés et moins de 1 % de certains éléments tels que le bore ou le cadmium. Le comportement des matériaux soumis au rayonnement intense dans l'enceinte active est plein de surprises, car des changements considérables dans leurs propriétés physiques et mécaniques sont courants. Ces problèmes et d'autres encore font que la construction de ces appareils est délicate et demande, outre le savoir du personnel technique, des installations de fabrication modernes et une main-d'œuvre qualifiée.

Pour estimer les possibilités d'application de l'énergie nucléaire, il faut avoir présentes à l'esprit ses caractéristiques principales. En premier lieu, elle dispose de réserves de combustible immenses, puis, et c'est là peut-être le point le plus important, la masse consommée par unité de travail est très petite, éliminant ainsi le problème du transport du combustible. Cette question mérite que l'on s'y arrête un instant. Une centrale thermique telle que celle de Philadelphie, produisant 300.000 kW., absorbe par heure

100 tonnes de charbon, soit 100 wagons de 20 tonnes par jour. Une telle usine doit être placée près d'un cours d'eau ou d'une ligne de chemin de fer importante, ou mieux encore près de la mine, ce qui soulève la question du transport du courant électrique aux centres de consommation. Mais le transport de l'électricité est cher, les frais d'installation des lignes à haute tension sont élevés ainsi que les pertes. On estime qu'au-delà de quelques centaines de kilomètres, il vaut mieux transporter le combustible que le courant. La même centrale en énergie nucléaire n'utiliserait que quelques kilos d'uranium par jour, et pourrait être située n'importe où. On entrevoit immédiatement la possibilité de la placer dans des régions pauvres, sous-développées, dans le désert même qu'elle permettrait d'irriguer et de cultiver. Nous avons vu que l'uranium enrichi constitue une source d'énergie extraordinairement concentrée, mais que sa fabrication consomme de grandes quantités de courant électrique. On pourrait aménager les ressources hydrauliques immenses de l'Afrique équatoriale pour concentrer de l'uranium, utilisable partout presque sans frais de transport, valorisant ainsi des réserves inexploitées par les méthodes usuelles.

La décentralisation des usines électriques est donc un avantage essentiel de l'énergie nucléaire. La limite inférieure de puissance unitaire ne se laisse pas encore préciser. 20.000-30.000 kW. semblent actuellement économiquement réalisables. En arrivera-t-on au réacteur individuel pour le chauffage des maisons ? Il n'est pas encore possible de le dire. L'utilisation de certains sous-produits de fission, tels que le strontium 90 à rayonnement β , semble cependant réalisable.

Mais à côté de ces facteurs positifs, d'autres points doivent être relevés, dont l'un des plus importants est la question de sécurité. Un réacteur est une source de radiation intense qu'il faut enfouir sous des tonnes de béton ou des mètres d'eau pour ne pas mettre en danger le personnel. En cas d'avarie, des gaz ou poussières radioactifs peuvent se répandre dans l'atmosphère et contaminer les alentours. Des précautions sévères sont donc indispensables. Il ne faut toutefois pas s'exagérer les risques. Nous sommes soumis en permanence à de multiples radiations, rayons cosmiques, radioactivité du potassium etc., et nous pouvons supporter sans inconvénient des doses très supérieures. Les mesures à prendre sont très semblables à celles en usage dans l'industrie chimique et une légis-

lation très stricte réglera sous peu ces questions. Je ne crois pas passer la mesure en affirmant que si la combustion du charbon ou de l'essence avait été découverte de nos jours on exigerait des précautions draconiennes contre les gaz nocifs qu'elle émet. On s'habituerait tout aussi bien au danger radioactif.

Un autre inconvénient d'un réacteur nucléaire est le fait que les produits de la fission, comparables aux cendres et scories d'une centrale thermique, sont hautement radioactifs, avec des périodes partiellement très longues, de sorte qu'il faut prendre des dispositions très spéciales pour éviter tout accident. On a proposé diverses méthodes : les unes fantaisistes encore, telles que l'expédition par fusée dans les espaces interplanétaires ; d'autres sont plus sérieuses et montrent que le problème n'est pas insoluble. Si ces cendres sont dangereuses, elles contiennent d'autre part de nombreux éléments rares et très recherchés. D'une tonne d'uranium on peut extraire par exemple 83 kg. de ruthenium, 16 kg. de rhodium, 7 kg. de palladium, 13 m³ de xenon d'une valeur totale actuelle de 600.000-700.000 fr. En outre, le strontium 90 émettant des rayons β pourrait être utilisé comme source individuelle de chaleur, 1 kg. de Sr équivalant à 14 kW.

Le réacteur nucléaire ne se prête pas à des variations rapides de la charge. On cherchera donc à l'utiliser comme énergie de base, permettant de réserver les usines hydrauliques à la fourniture de l'énergie de pointe, vendue à un prix plus élevé. Il permet donc une revalorisation des installations hydro-électriques, rendant rentables des projets trop chers actuellement. Des installations d'accumulation combinées avec pompage sont également à envisager. Loin de rendre inutile l'utilisation de nos cours d'eau, l'énergie nucléaire la complète et améliore son facteur économique.

Enfin, il faut insister sur une particularité unique des réacteurs nucléaires, la faculté de remplacer le combustible détruit par un autre corps fissible. Cette propriété de régénération permet d'espérer que le coût de l'énergie nucléaire pourra être considérablement réduit, parce que des éléments non fissibles tels que l' U^{238} ou le thorium dont il existe de vastes gisements peuvent être compris dans l'estimation des réserves.

De ce qui précède il résulte que les physiciens ont mis à la disposition de la technique une source d'énergie nouvelle dont les caractéristiques sont fort intéressantes. Est-il nécessaire de la

mettre à contribution ? C'est ce que je vais essayer de discuter rapidement.

B. Aspects économiques

C'est un lieu commun d'affirmer que la production d'énergie est le soutien de toute civilisation moderne. Les statistiques font nettement ressortir ce fait. Prenons l'exemple de la Suisse : en 1953, la consommation d'énergie a atteint 12 milliards et demi de kWh., ce qui représente par habitant 3000 kWh. Si on réfléchit qu'un homme robuste et travaillant à plein, produit au maximum $\frac{1}{2}$ kWh. par jour, on se rend compte que ces 3000 kWh. par an équivalent approximativement au travail continu de 12 hommes. On peut donc dire que chacun de nous dispose de 12 esclaves infiniment plus sobres que ceux de l'antiquité. Outre la consommation d'électricité, on absorbe en Suisse une quantité cinq fois plus grande d'énergie sous forme de chaleur, combustibles solides ou liquides. Or, cette consommation d'énergie n'est pas constante, mais elle augmente au contraire chaque année à un taux impressionnant. Il y a déjà plusieurs années que ce fait inquiète les économistes, et de nombreuses études ont été faites à ce sujet pour essayer de prédire quelle sera la consommation d'énergie dans les cinquante ou cent années à suivre. Il est intéressant de donner ici un court résumé d'une étude remarquable qui a été faite à l'instigation de l'Atomic Energy Commission des États-Unis. Les renseignements qui vont suivre sont tirés en partie du livre de Putnam : « Energy in the future », ouvrage remarquable par sa documentation, et de quelques travaux publiés par l'UNESCO.

Si l'on veut prédire la consommation d'énergie dans l'avenir, deux facteurs essentiels doivent être retenus. Tout d'abord le mouvement de la population, ensuite la consommation d'énergie par tête. Voyons d'abord le premier point :

Dans la figure 6, on a reporté l'évolution de la population mondiale en fonction des années. Cette courbe est intéressante pour deux raisons. Tout d'abord, on voit que jusqu'aux environs de 1600, cette population est restée sensiblement constante. Il va sans dire que la marge d'incertitude est assez grande, mais malgré tout, on peut admettre qu'il n'y a pas eu d'augmentation sensible de la population jusqu'à cette période. Par contre, depuis 1600 c'est une

montée en flèche et toujours plus accélérée du nombre des habitants du globe. Ce qui est remarquable, c'est que cette augmentation de la population s'est produite simultanément dans des régions totalement indépendantes et très éloignées les unes des autres avec encore des moyens de communication pratiquement inexistants. Aussi bien en Europe qu'en Chine, on relève des courbes d'accroissements de la population tout à fait parallèles.

Le second point est que l'on ne remarque sur cette courbe aucune inflexion sensible qui serait due soit à des épidémies, soit à des guerres, qui ne jouent donc pas le rôle de régulateur qu'on leur a souvent prêté autrefois. Non seulement l'accroissement de la population est impressionnant, mais, si l'on reporte le taux annuel d'augmentation, on voit que celui-ci monte également très rapidement. Il va sans dire que ce taux est très différent suivant les régions considérées et les chiffres indiqués ici ne représentent qu'une moyenne pour l'ensemble du globe (fig. 7).

Voyons maintenant ce que cela signifie du point de vue de la consommation d'énergie. Les considérations qui suivent se rapportent à la consommation totale d'énergie, que celle-ci soit thermique, mécanique ou électrique, en kWh.

La figure 8 montre le développement de la production mondiale d'énergie de 1860 à nos jours. Le rôle du charbon, prépondérant jusqu'au début du siècle, tend à diminuer. Il est de plus en plus remplacé par les huiles minérales et le gaz naturel. Ceci est dû au fait que les gisements d'exploitation économique s'épuisent et à la difficulté de recrutement des mineurs. Son prix de revient est de plus en plus élevé. Ce graphique reflète que la consommation d'énergie augmente encore beaucoup plus rapidement que la population, puisqu'elle a plus que décuplé depuis 1860, alors que le nombre d'habitants doublait seulement. Ce fait traduit l'amélioration du niveau de vie et il faut s'attendre à ce qu'il s'accroisse non seulement dans les pays retardés, mais également dans les régions fortement industrialisées. En effet dans ces dernières on observe une transformation de la structure démographique en ce sens que la fraction de la population productrice de biens de consommation diminue pendant que la population totale augmente. Il faut donc pour maintenir seulement le niveau de vie augmenter la productivité du travailleur, ce qui implique un accroissement de la consommation d'énergie. Le diagramme (fig. 9) représente un essai

d'extrapolation des mouvements de la population et des besoins en énergie correspondants. La courbe donne la quantité d'énergie cumulée, c'est-à-dire celle qui a été consommée depuis le début des estimations jusqu'à la date considérée. On a admis un taux minimum et un maximum de 5 %. Il ressort de cette figure que l'on utilisera de 1950 à 1975 autant de kWh. que pendant tout le siècle précédant cette date. Le diagramme tient encore compte de l'amélioration du rendement des installations qui procure une économie non négligeable. Cette amélioration est frappante entre 1900 et 1950, elle se ralentit ensuite et tend vers une limite imposée par le principe de Carnot. Le tableau 2 résume la situation actuelle : sur les 30.000 milliards de kWh. nécessaires, chaque année, seuls 2000-3000 milliards sont fournis par des sources permanentes, se renouvelant chaque année, telles que le bois, les déchets agricoles, les usines hydro-électriques, etc. Il semble possible de porter ce chiffre à 4500-5000 milliards de kWh., mais cela ne représente que 15 % des besoins actuels. Le reste doit être couvert par les combustibles fossiles, charbons, tourbes et lignites, huiles, etc., que l'on peut comparer à un capital que nous sommes en train de dépenser rapidement. On estime les réserves exploitables, à des prix au plus deux à trois fois plus élevés que maintenant, à environ 6000 trillions de kWh. pour le charbon, et à 1500 trillions de kWh. pour les huiles minérales, au total, y compris les huiles de schistes, lignites, etc., 8000 trillions de kWh. En reportant cette valeur sur la figure 9, on voit que ces réserves seront épuisées vers l'an 2020-2040. Il est vrai qu'on a déjà prédit souvent l'épuisement à brève échéance des gisements de pétrole et toujours on en a trouvé de nouveaux à temps, de sorte que ce délai de 80 ans est certainement très élastique. Une source littéralement inépuisable est constituée par le rayonnement du soleil. Nous n'en employons actuellement sous forme de bois, d'hydro-électricité, etc., qu'une fraction négligeable. Bien que son utilisation directe soit techniquement possible, son exploitation serait réservée aux pays jouissant d'un climat chaud et peu nuageux. Il est certain que la science trouvera les moyens d'employer cette énergie, résolvant ainsi définitivement ce problème. En attendant, les possibilités qu'offre l'énergie nucléaire semblent la destiner à prendre la succession des combustibles actuels, d'autant plus que ceux-ci constituent une matière première indispensable à la chimie moderne des résines synthétiques.

C'est un gaspillage dangereux de détruire ces réserves irremplaçables en les brûlant simplement. On peut donc ajouter au tableau les gisements de thorium et d'uranium. Ces deux éléments ne sont pas rares. Dans l'échelle de fréquence dans la croûte terrestre, ils se situent au même niveau que des métaux courants tels que le zinc, le plomb, le cobalt, le cuivre même. Toutefois les dépôts d'une teneur suffisante pour permettre une exploitation économique sont relativement peu fréquents, de sorte que l'on estime le total des gisements utilisables à environ 25 millions de tonnes d'uranium. Exprimée en kWh., cette quantité vaut 20 à 25 fois les réserves en combustibles fossiles, et cela repousse d'autant le moment où l'énergie solaire sera notre seule ressource.

En résumé, tous ces facteurs — augmentation de la consommation d'énergie, accroissement du prix du charbon, utilisation de ce dernier comme matière première — parlent en faveur d'une mise en œuvre à brève échéance de l'énergie nucléaire.

Voyons maintenant les répercussions que la mise en œuvre de ces nouvelles techniques peuvent avoir sur l'industrie. Celle-ci doit se préparer à exercer son activité dans ce domaine, mais on doit se demander quelle importance relative il faut lui accorder, et c'est ici que se pose la question primordiale du prix de revient de l'énergie nucléaire. Actuellement, il est indiscutablement trop élevé. Une étude américaine présentée à la conférence de Genève est très instructive. L'auteur a estimé pour l'année 1965 la proportion des installations nouvelles attribuée à l'énergie atomique en fonction du prix de revient du kWh. Il arrive à la conclusion que si ce dernier coûte plus de 0,6 cent (3 ct.), 10 % au plus des nouvelles usines s'équiperont avec des réacteurs nucléaires ; si le prix baisse à 0,4 cent, c'est le 40 % des nouveaux projets qui leur sera attribué, et 60 % s'il est possible de descendre à 0,3 cent (1,3 ct.). Pour les conditions européennes, où le charbon et les hydrocarbures coûtent deux à trois fois plus qu'aux Etats-Unis, on peut doubler environ ces prix de revient pour arriver à la même proportion. Il est hors de doute que si les prix actuels dépassent encore de beaucoup ces chiffres, on n'en sera pas éloigné dans dix ans : l'expérience courante montre que la valeur d'un produit baisse considérablement dans les années qui suivent son lancement. La figure 10 indique, toujours sur la base d'une estimation américaine, comment les frais d'installation d'une centrale nucléaire s'abaisseront dans

l'avenir. Elle montre également leur répartition approximative entre les divers postes. Les milieux industriels américains comptent d'ores et déjà sur un chiffre d'affaires élevé dans ce domaine. L'Atomic Industrial Forum a publié les résultats d'une enquête dont nous tirons la figure 11 : elle représente deux estimations du volume d'affaires annuel. L'estimation minimum n'accorde qu'une faible importance aux installations stationnaires; les machines propulsives pour bateaux, sous-marins, locomotives, avions, alimentent seules le marché. C'est là une des caractéristiques de la technique nucléaire américaine qui attache jusqu'ici plus d'importance au poids et à l'encombrement des appareils qu'à leur économie. Dans l'estimation maximum, ce n'est qu'à partir de 1960 que les installations fixes prennent de la valeur. Dans les deux cas les chiffres avancés comprennent plusieurs centaines de millions de dollars. Il faut relever ici la fraction élevée (20 % environ) consacrée aux recherches et développements de l'industrie privée, et ceci malgré la situation très favorable des industriels américains qui peuvent profiter de toutes les études et expériences faites à grands frais par le gouvernement.

Pour les Etats-Unis, qui disposent encore de combustibles fossiles à bas prix, l'énergie nucléaire est encore réservée à des cas particuliers. Ils disposent donc de quelques années de répit qu'ils utilisent à des études et essais destinés à chercher les types les plus économiques de réacteurs. Il n'en est pas de même en Angleterre où la pénurie de charbon se fait toujours plus sentir. Aussi les Anglais ont-ils passé immédiatement à la réalisation d'un vaste programme comportant douze réacteurs dont les deux premiers, ceux de Calderhall, doivent entrer en service cette année. Ils sont du type à uranium naturel et graphite, qui est bien connu et offre le minimum d'aléas. Le prix de revient du kWh. est ici fortement influencé par le rachat par l'Etat du plutonium produit dans ces installations. L'exemple de l'Angleterre sera certainement suivi à bref délai par d'autres pays européens qui se trouvent dans une situation énergétique semblable.

Pour fixer les idées quant à l'ordre de grandeur des capitaux nécessaires à la construction d'une centrale nucléaire, il est intéressant de comparer les frais d'installation à ceux des usines conventionnelles. Une centrale thermique à vapeur coûte 550-700 fr. par kW. installé, avec moteurs Diesel 650, l'usine hydro-électrique

revient à 800-2000 fr. suivant qu'il s'agit d'une installation au fil de l'eau ou avec bassin d'accumulation, la centrale nucléaire à 1000-2000 fr. pour autant que l'on puisse actuellement faire des estimations. Mais la réalisation d'une centrale nucléaire est loin de représenter le seul effort économique nécessaire. Pour que cette centrale puisse fonctionner, il faut lui fournir du combustible, donc extraire du minerai, le raffiner, le traiter, fabriquer et purifier les modérateurs, construire les appareils de contrôle et de mesure, prévoir les usines de traitement des matériaux irradiés, l'extraction des isotopes, la destruction ou l'utilisation des produits de fission, etc. Ceci représente pour les industries chimiques, métallurgiques, électroniques de nouveaux domaines d'activité posant souvent des problèmes très délicats. Il faut citer en particulier la chimie des corps radioactifs, où toutes les opérations doivent se faire à distance, si possible dans des usines entièrement automatiques.

Les investissements dans ces services auxiliaires sont estimés par les experts américains aux valeurs suivantes, toujours rapportées à 1 kW. installé :

Mines d'uranium	5- 10 fr.
Raffinement de l'uranium	5- 15 fr.
Enrichissement	150-350 fr.
Fabrication des éléments	20- 60 fr.
Traitement des éléments radioactifs	130-260 fr.
Protection, mesures de sécurité	40- 80 fr.

Estimons encore le prix du combustible : l'uranium métallique naturel à 0,7 % d' U^{235} coûte actuellement 300 fr. par kg. Il en faut de 0,2 à 5 kg. par kW. suivant le type de réacteur. On admet qu'il est possible de produire 25 millions de kWh. par tonne d'uranium avant de procéder à la régénération des barres, ce qui équivaut à une dépense de 2-3 ct./kWh. Ce chiffre est comparable à celui du charbon, mais il faut y ajouter les frais d'installations et d'amortissement plus élevés.

En utilisant de l'uranium enrichi, ces derniers peuvent être considérablement réduits, mais l'uranium 235 coûte très cher — 85 fr. le gramme — de sorte que son usage ne se justifie économiquement que dans un réacteur convertisseur pour lequel il suffit d'une charge initiale, son fonctionnement créant autant de matière fissible qu'il en consomme.

En ce qui concerne la Suisse, les experts estiment que nos forces hydrauliques seront complètement équipées dans 20-25 ans. Après ce délai, il faudra soit construire des usines thermiques, nucléaires ou à charbon, soit importer du courant, ce qui présente de gros inconvénients. Une usine à vapeur de 300.000 kW. située à Bâle, c'est-à-dire favorablement au point de vue transport, pourrait fournir le courant à environ 3,5 ct/kWh., dont 2,6 ct. pour les frais de combustibles. Si l'usine était située à Zurich, le transport Bâle-Zurich renchérirait le kWh. de 0,8 ct. soit 20 %. On voit par cet exemple donné par M. Winiger, directeur de l'Elektro-Watt, l'intérêt que présenterait l'usine atomique pour notre pays. Dans un réacteur convertisseur, les frais de combustible sont faibles, l'installation initiale pourrait donc coûter beaucoup plus que la centrale thermique correspondante. Aux Etats-Unis on estime qu'il y a équivalence pour un prix 3 fois plus élevé, soit de l'ordre de grandeur de 1000 fr/kW. En Suisse un facteur 5-6 paraît acceptable. On voit que les conditions économiques sont chez nous favorables au développement de l'énergie nucléaire.

Outre la production d'électricité, un autre domaine semble intéressant pour la Suisse. En effet 70 % de nos besoins en énergie sont consommés sous forme de chaleur et sont couverts uniquement par des importations. Il est possible d'avoir recours au moins partiellement à l'énergie nucléaire. Les problèmes techniques sont beaucoup plus simples que pour la production d'électricité parce que les températures n'ont pas besoin d'être très élevées. Une telle source de chaleur serait idéale pour l'industrie chimique ou le chauffage à distance centralisé. Ici encore le problème du transport représente un facteur favorable.

D'après ce qui précède, il est hors de doute que la Suisse ne peut pas rester à l'écart de la technique atomique, qui représentera à l'avenir une fraction de l'activité industrielle totale qu'il est encore difficile d'estimer, mais qui ne sera certainement pas négligeable. Or, notre industrie lourde est axée sur les installations énergétiques, qu'il s'agisse de turbines hydrauliques, à vapeur ou à gaz, de chaudières, de moteurs Diesel ou d'équipement électrique. Si cette industrie veut maintenir sa place sur le marché mondial — et c'est une nécessité vitale pour notre pays — elle doit se préparer à satisfaire à la demande dans ce domaine. C'est dans ce but qu'un groupe d'industriels a fondé au début de 1955 une société

d'études, la Réacteur S. A., dont la genèse est la suivante :

Après la publication en 1946 du rapport Smyth, le premier texte officiel sur la bombe nucléaire, plusieurs entreprises suisses ont commencé l'étude de ces problèmes. Très vite, on s'est rendu compte que cette tâche dépassait les moyens de chacune d'elles, à cause du secret entourant toutes les données numériques nécessaires à une réalisation. Sur l'initiative de Brown Boveri, trois maisons, Escher Wyss, Sulzer et Brown Boveri, ont alors formé un groupe d'études commun se répartissant le travail et entretenant des relations étroites avec la Commission suisse pour l'énergie atomique, présidée par le professeur Scherrer. Les travaux de ce groupe étaient à la fin de 1954 assez avancés pour qu'une réalisation puisse être envisagée, et c'est là la tâche de cette nouvelle société. Une entreprise de cette envergure ne se conçoit que sur une base nationale. Le financement est assuré par des contributions de 48 actionnaires, dont plusieurs représentent chacun un groupe d'industries. La Confédération y est fortement représentée, nécessité due aux incidences internationales de ces questions. En effet, l'uranium n'est pas un produit que l'on peut se procurer librement sur le marché, il faut toujours des contrats de pays à pays pour en obtenir des quantités même restreintes.

Le projet prévoyait la construction d'un réacteur expérimental, d'une puissance thermique de 10-20 mW. établi de façon à permettre l'essai de divers éléments de construction, et la mesure des constantes physiques nécessaires au calcul de réacteurs industriels. La conférence de Genève a considérablement facilité la tâche par la multitude de renseignements et de données jusqu'ici secrètes qu'elle a fournis. Elle a en outre permis d'acquérir à un prix très réduit le réacteur de démonstration qui, transporté au centre de Würenlingen, et modifié, constitue un premier instrument de travail de grande valeur. Il permettra de ne pas attendre la mise en service du premier prototype avant de s'attaquer à des projets industriels. Il s'écoulera encore quelques années avant que le premier réacteur industriel suisse soit en service, d'autant plus que les opinions divergent encore considérablement sur la ligne à suivre et le type d'installation le plus avantageux. Mais dans l'art de l'ingénieur il est beaucoup plus important de se familiariser de bonne heure avec une technique nouvelle, au risque de ne pas réussir au premier essai, que d'attendre que la concurrence ne nous

ait définitivement laissés en arrière. Le réacteur de Würenlingen étant un engin de recherches physiques et technologiques ne produira pas d'énergie électrique, mais seulement de la chaleur, la transformation de cette dernière en électricité ne posant pas de problème nouveau.

Conclusion

Quelle conclusion faut-il tirer de cet exposé très incomplet ? Il semble bien qu'à moins de développements imprévisibles, l'énergie nucléaire doive jouer un rôle important dans l'économie mondiale des prochaines années. Ce rôle sera-t-il assez grand pour que l'on puisse parler de révolution, comparable à celles produites par l'avènement de la machine à vapeur ou du moteur électrique ? Je ne le crois pas parce que contrairement à ces derniers l'énergie nucléaire ne nous apporte rien de foncièrement nouveau, rien qui ne puisse être obtenu par d'autres moyens. Je parle ici uniquement de la production d'énergie et non de celle d'isotopes qui pose d'autres problèmes. Son avènement est avant tout fonction de la pénurie des combustibles classiques et non de ses qualités intrinsèques. Il me semble que le terme de révolution s'appliquerait bien davantage à une autre découverte moderne, l'électronique et son corollaire, l'automatisation à outrance dont les conséquences économiques et sociales seront certainement essentielles pour la civilisation à venir. Si la curiosité du public se porte surtout sur l'atome, cela est dû aux communications sensationnelles de tous genres, aux récits des explosions atomiques, à la menace réelle qu'elles représentent pour l'humanité, tous faits susceptibles de fausser le jugement. En essayant de fournir des renseignements objectifs on pourra lutter contre deux tendances aussi erronées l'une que l'autre, dont l'une considère l'énergie nucléaire comme une panacée et l'autre veut lui dénier toute valeur pratique. L'atomistique nous offre certainement des sources d'énergie et de radiation nouvelles dont on ignore encore les possibilités. C'est à nous d'en tirer le meilleur parti.

Table 1

Unités d'énergie :

1 kWh.	= 3,6 . 10 ⁶ joule
	= 366.000 mkg.
	= 860 kcal.
	= 2,2 . 10 ¹⁹ MeV.
1 MWh.	= 1000 kWh.
Principe d'équivalence.....	E = mc ² .
	1 kg. = 25.000.000.000 kWh.
Réaction chimique	C + O ₂ → CO ₂ + 8,5 kWh/kg.
Réaction nucléaire :	
a) fission	U ²³⁵ → Sr + Xe + 25.000.000 kWh/kg.
b) fusion	Li + H → 2 He + 70.000.000 kWh/kg.
1 kg. hydrocarbure	10.000 kcal. = 11,6 kWh.
1 m ³ gaz naturel	8.600 kcal. = 10 kWh.
1 kg. charbon	7.200 kcal. = 8,4 kWh.

Table 2

Consommation mondiale : 1850		3 . 10 ¹² kWh/an
1950		30 . 10 ¹² kWh/an
Taux actuel d'augmentation		3,1 % par an
1. Sources permanentes :		
Energie solaire totale		10 ¹⁸ kWh/an
Actuellement utilisé ou utilisable :		
	1950	1980
Bois	1,2 . 10 ¹²	2,5 . 10 ¹² kWh.
Déchets agricoles	0,6 . 10 ¹²	0,5 . 10 ¹² kWh.
Hydro-électricité	0,3 . 10 ¹²	1,0 . 10 ¹² kWh.
Vents, marées, volcans, soleil	0	0,5 . 10 ¹² kWh.
Total	2,1 . 10 ¹²	4,5 . 10 ¹² kWh/an
2. Combustible fossile, réserves utilisables :		
Charbon		6 . 10 ¹⁵ kWh.
Huiles minérales		1,5 . 10 ¹⁵ kWh.
Divers		0,5 . 10 ¹⁵ kWh.
Total		8 . 10 ¹⁵ kWh.
3. Combustible fissible :		
Uranium + Thorium	180	. 10 ¹⁵ kWh.

Table 3

Centrales nucléaires en construction :

U. S. A.	Puissance	Mise en service
Shippingport	60-100 mW.	1957
5 réacteurs d'essais de types divers	~ 15 mW.	1956-1959
Angleterre :		
Calderhall	50- 90 mW.	1956
12 réacteurs du même type	1500 mW.	1957-1965
Dounray		1959
France :		
Marcoule	50 mW.	1956
Canada	20 mW.	1958
U. R. S. S.	2000 mW.	1956-1960
total		

Bibliographie

- P. PUTNAM : *Energy in the future*. Van Nostrand, New York, 1953.
Annuaire Statistique de la Suisse, 1953.
- A. WINIGER : « Fission nucléaire et production future d'énergie ». *L'Electrique* 29/4-5, juillet-août 1954.
Divers rapports de la conférence de Genève. Août 1955.
- R. STEPHENSON : *Introduction to Nuclear Engineering*. McGraw-Hill, New York, 1954.
- L. ARMAND : *Quelques aspects du problème européen de l'énergie*. Rapport O. E. C. E., juin 1955.
- *L'industrie de l'électricité en Europe*. Rapport O. E. C. E., janvier 1956.
- *A Growth Survey of the Atomic Industry 1955-1965*. Atomic Industrial Forum, New York, 1955.

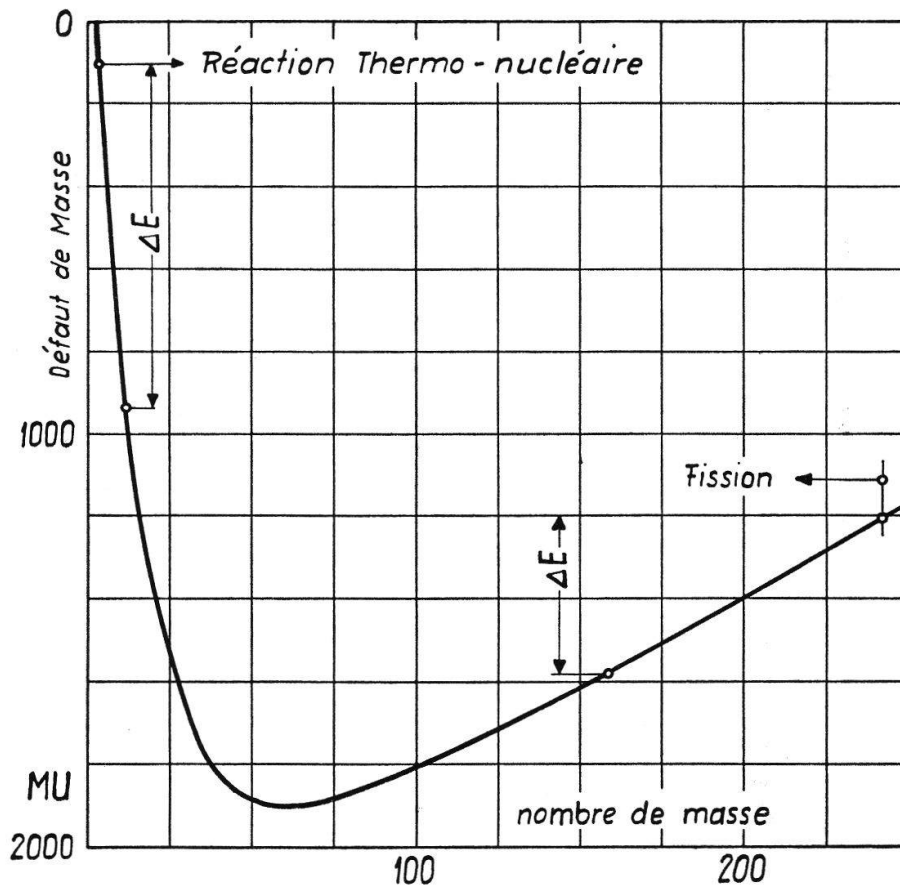


Fig. 1. Courbe du défaut de masse en fonction du nombre atomique, montrant les deux possibilités de libération de l'énergie de liaison des nucléons.

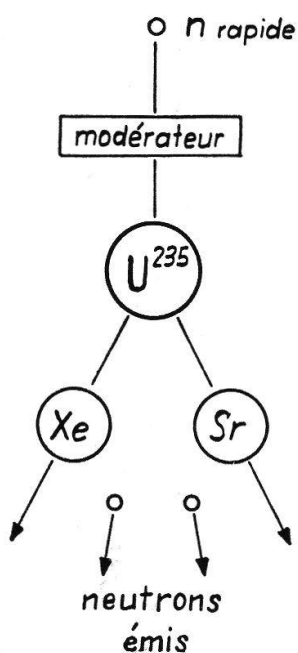


Fig. 2. Schéma de la fission de l'uranium 235. Sous le choc d'un neutron le noyau se brise en deux fragments inégaux (par exemple strontium et xenon) et émet deux ou trois nouveaux neutrons.

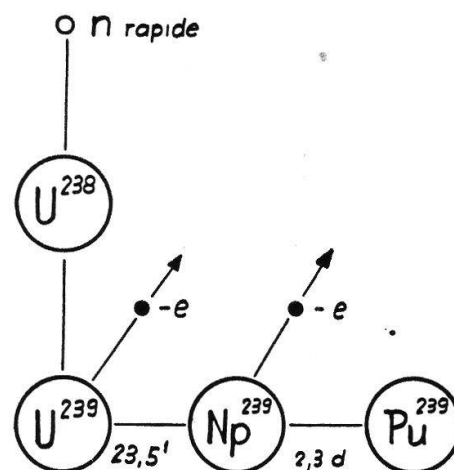


Fig. 3. Schéma de la formation de plutonium. Un neutron rapide est capturé par l'uranium 238. Le noyau U^{239} formé est instable et donne naissance, après émission de deux électrons, au plutonium 239, élément fissile.

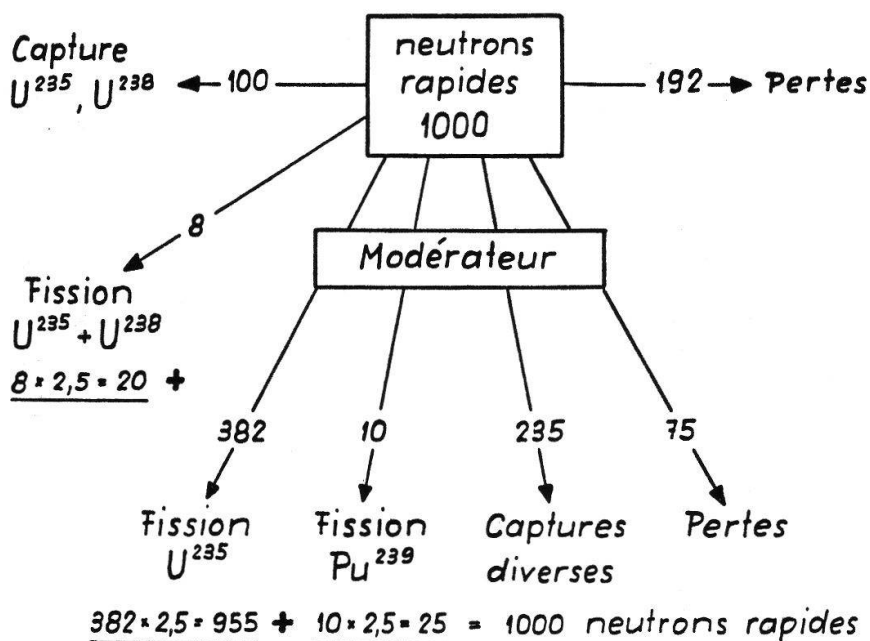


Fig. 4. Bilan des neutrons dans un réacteur en régime permanent. Les neutrons produits par la fission compensent exactement les neutrons initiaux et les pertes et captures parasites.

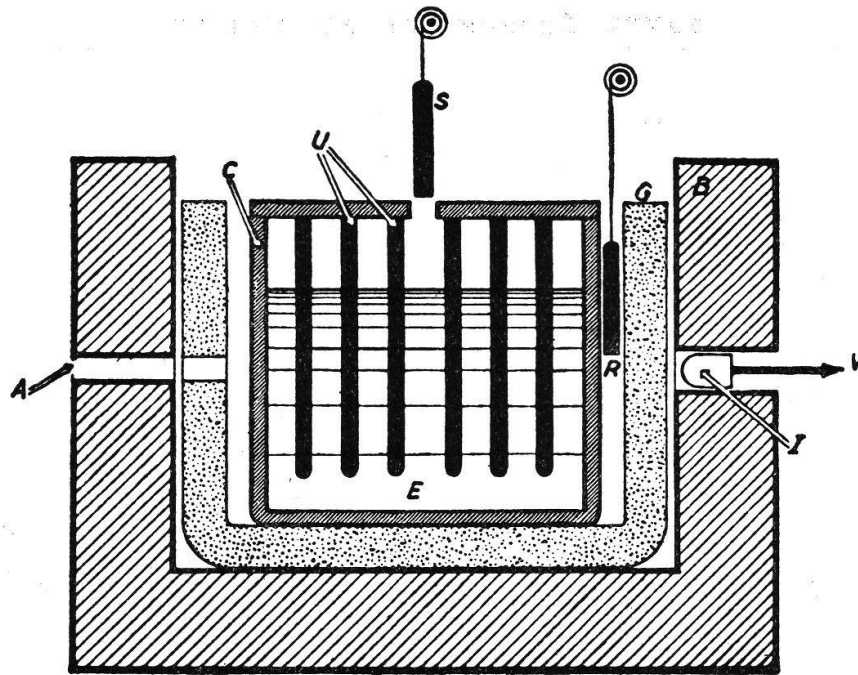


Fig. 5. Schéma d'un réacteur nucléaire à eau lourde. Les barres d'uranium U plongent dans le réservoir C d'eau lourde E. Un réflecteur en graphite G réduit les fuites de neutrons vers l'extérieur. Des barres de réglage en bore ou cadmium permettent de limiter la puissance dégagée par absorption de neutrons. La protection contre les radiations est assurée par le bloc de béton B.

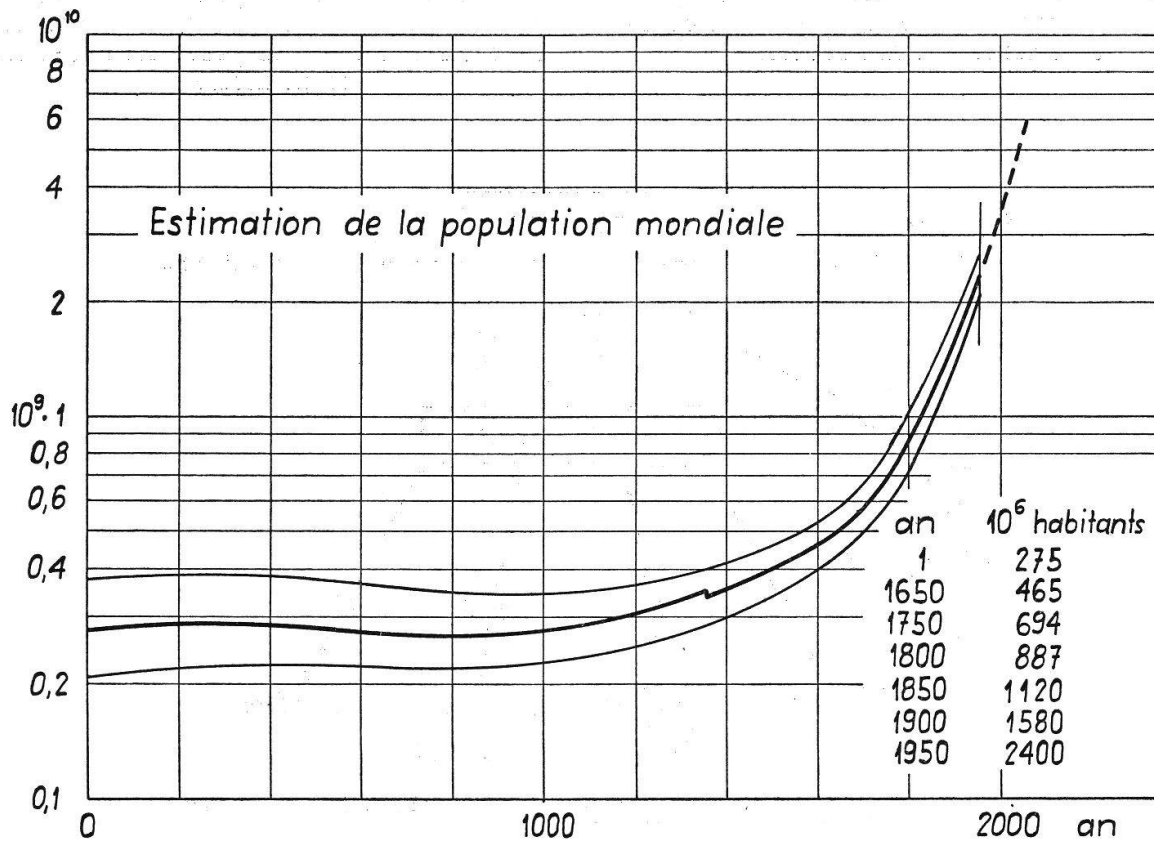


Fig. 6. Variation de la population mondiale. Les courbes extrêmes donnent la marge d'incertitude. Echelle logarithmique.

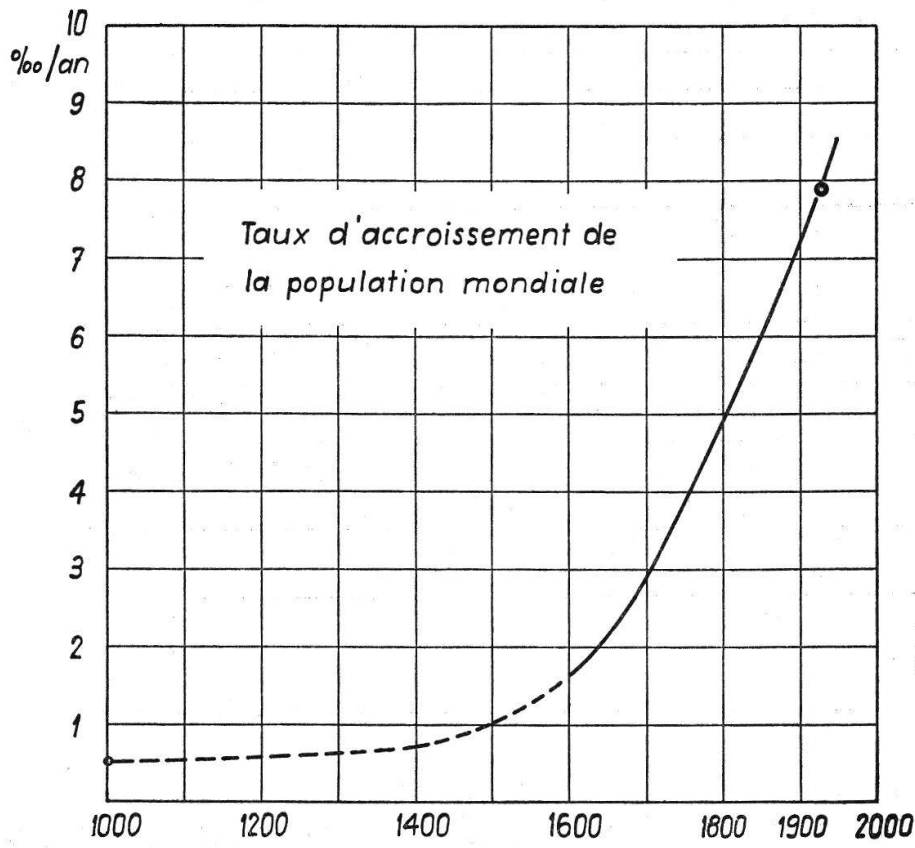


Fig. 7. Taux d'accroissement de la population mondiale.

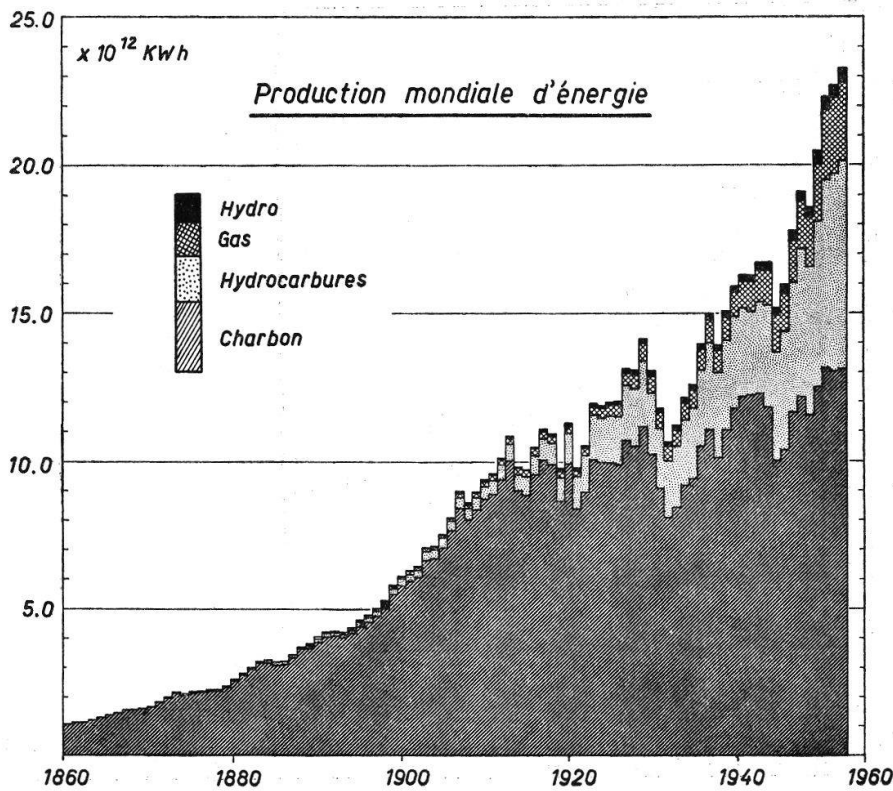


Fig. 8. Statistique de production d'énergie dans le monde. Le charbon a perdu sa position prépondérante.

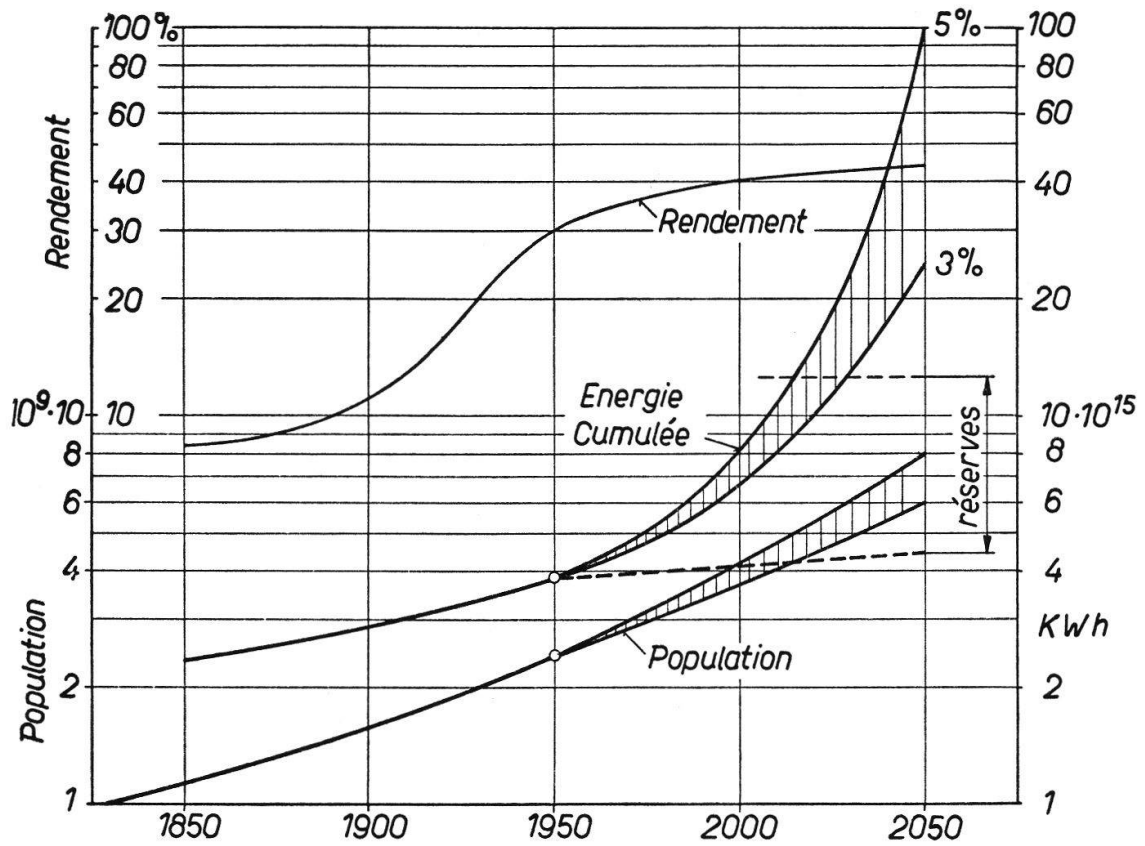


Fig. 9. Consommation probable d'énergie de 1950 à 2050. Les courbes représentent le total de l'énergie consommée jusqu'à la date considérée, le mouvement de la population et le rendement moyen de l'utilisation. Les réserves connues en charbon et huiles minérales seront épuisées vers 2020-2030.

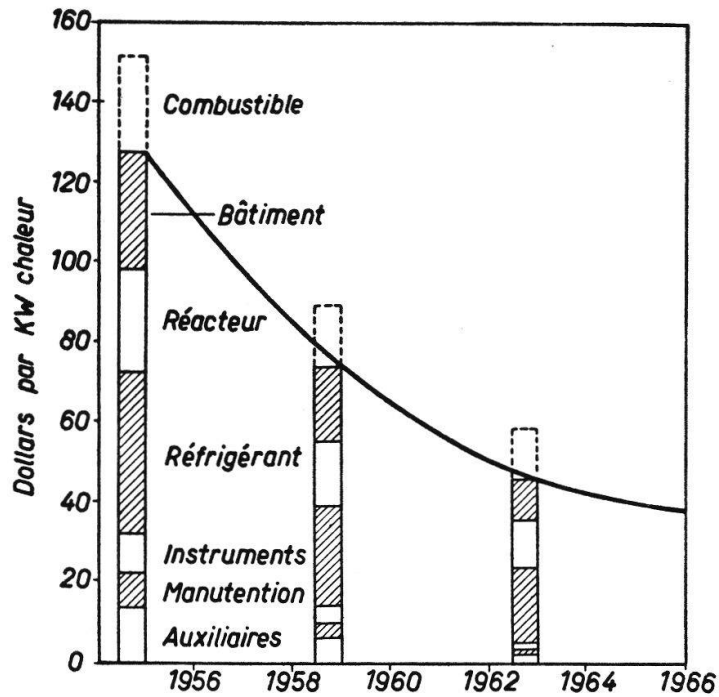


Fig. 10. Frais d'installation d'un réacteur nucléaire (sans machines thermiques ni partie électrique). Le diagramme indique la diminution probable des investissements avec les années, ainsi que la répartition des frais entre les divers éléments de l'installation.

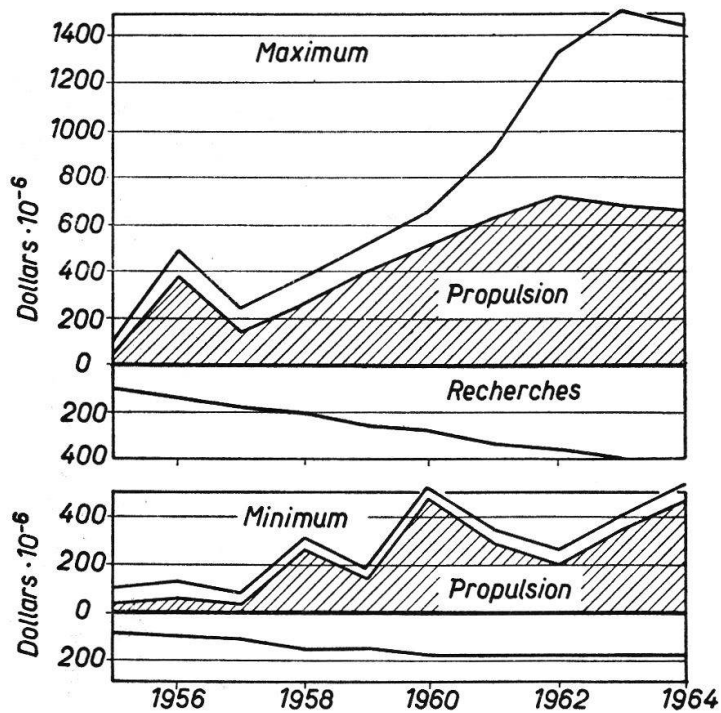


Fig. 11. Estimation du chiffre d'affaires d'un réacteur nucléaire aux Etats-Unis. La courbe supérieure donne le chiffre d'affaires total en millions de dollars par an. La zone hachurée se rapporte aux machines destinées à la propulsion de bateaux, sous-marins, avions, etc., ainsi qu'aux centrales mobiles militaires.

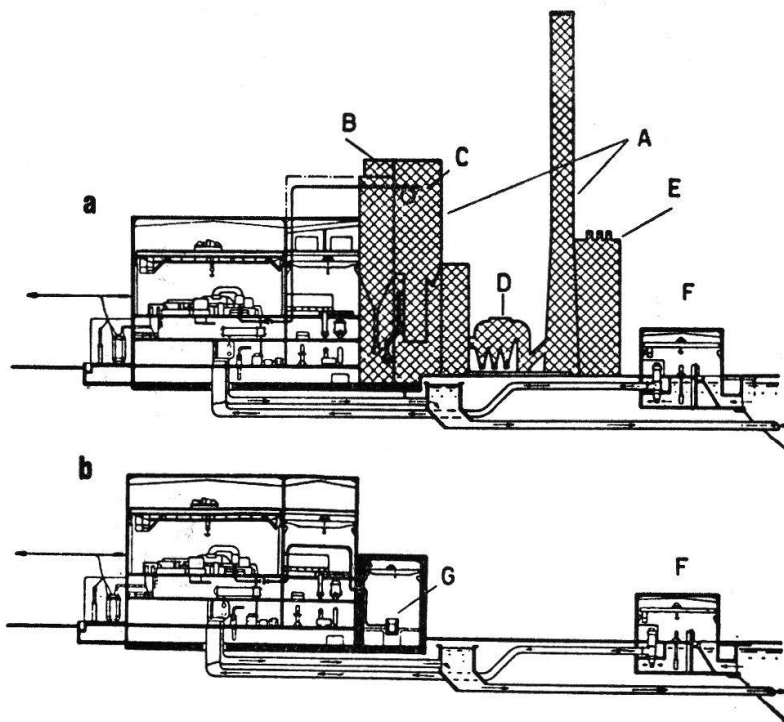


Fig. 12. Comparaison entre une centrale thermique à charbon ou nucléaire. Les parties thermiques et électriques sont identiques. La chaudière C, les silos à charbon B, les séparateurs de poussières D, la cheminée A et les silos à cendre E sont remplacés par le petit réacteur G. En F la station de pompage de l'eau de refroidissement.