

PRÉSIDENCE DU CONSEIL

# COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

## LE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

L. KOWARSKI

Rapport C.E.A. n° 477

1955

Centre d'Études nucléaires de Saclay

Service de Documentation

Boulevard n° 2 - Gif sur Yvette (S. 91 01)



# LE DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

par

L. KOWARSKI

*Commissariat à l'Énergie Atomique, Paris*

## I. INTRODUCTION

Dans le présent exposé, l'auteur s'est efforcé de tenir compte de toutes les données qui lui étaient accessibles à un moment séparé d'un mois à peine de l'ouverture du Congrès de Bruxelles. Il a pu ainsi tenir compte de nouveautés telles que la brochure officielle sur le Plan Quinquennal américain (1) ou la discussion du même Plan par le Forum Industriel Atomique de New York (2). Cependant l'évolution du sujet est si rapide dans les pays les plus avancés sur le terrain atomique, que les délais normaux de l'impression, et même la teneur de certaines communications présentées au même Congrès risquent d'enlever au présent exposé beaucoup de sa valeur d'actualité.

L'auteur a cherché, par conséquent, à introduire dans ses réflexions un élément s'ajoutant à la pure information sur les derniers progrès anglais ou américains, ou à la digestion de cette information. Cet élément est fourni par une différence essentielle qui sépare, et continuera de séparer du reste du monde, les pays « atomiques » tels que les États-Unis, l'U.R.S.S. et la Grande-Bretagne. Dans ces pays, la politique d'armement atomique a suscité l'existence de grandes installations productrices de matière fissile pure (U 235 et plutonium) ainsi que d'importants stocks de cette matière. Les stocks étant là, et les questions économiques entrant à peine en ligne de compte, les gouvernements ont toujours la possibilité d'en allouer de petites quantités à des recherches non militaires.

Un large usage est actuellement fait de cette possibilité, et nous verrons plus loin dans quelle mesure le sens de l'expression « petites quantités » est relatif. La pensée technologique dans les pays ainsi pourvus est profondément façonnée par la disponibilité de ces ressources et tend à chercher des solutions dont quelques-unes sont totalement inaccessibles aux pays moins fortunés, et d'autres ne constituent que des indications, sur la base desquelles les techniciens des « pays sans stocks » auront à élaborer des variantes mieux adaptées à leurs circonstances.

Parmi ces pays, la France et le Canada détiennent actuellement les premières places, avec une production déjà pondérable de plutonium et avec la perspective d'en produire, dans un proche avenir, assez pour pouvoir alimenter un modeste programme de recherches et de réalisations expérimentales. Les autres pays, où la production des matières fissiles pures est négligeable ou nulle, ne doivent pas nécessairement être considérées comme entièrement hors de course; certaines ressources leur deviendront prochainement accessibles dans le cadre du Pool Eisenhower — et il n'est pas interdit d'imaginer, même en absence de tout signe concret, que cette initiative soit un jour suivie d'autres, d'une portée peut-être moins universelle, mais s'étendant à des

ensembles plus vastes qu'un seul état national. La différence entre les pays qui possèdent un peu de matière fissile et ceux qui n'en ont pas du tout promet ainsi de diminuer dans une mesure suffisante pour que la pensée technologique se développe, dans ces deux catégories, sur des voies à peu près identiques. Nous ne ferons donc qu'une seule distinction, celle entre les « pays à stocks » définis plus haut, et les « pays sans stocks », dont les ressources en m.f. pure resteront, dans l'avenir prévisible, au-dessous de 10 kg par an dans la plupart des cas, et sensiblement au-dessous de 100 kg/an dans les cas les plus favorables.

Ces indications numériques se rapportent à la fois à la matière fissile pure ou presque pure et à l'U 235 d'appoint, par lequel l'uranium enrichi, même à un degré faible mais significatif, se distingue de l'uranium naturel.

Dans l'exposé qui suit, les données qui nous parviennent des « pays à stocks » sont systématiquement confrontées avec les réalités avec lesquelles les « pays sans stocks » ont à compter. Ce souci de réévaluation s'ajoute aux renseignements contenus dans la plupart des études antérieures (3) et constitue, pour l'auteur, le seul espoir d'y ajouter un élément momentanément valable.

## II. ENONCE DU PROBLEME INDUSTRIEL ET DE SES SOLUTIONS

La fission nucléaire des éléments lourds dégage environ 23.000 kWh par gramme de matière désintégrée, soit autant que la combustion d'environ 3 tonnes de charbon. La perspective de remplacer ces 3 tonnes par un seul gramme d'uranium ou de thorium est d'autant plus tentante que ces éléments ne sont pas rares: leur abondance dans l'écorce terrestre est comparable à celle de certains métaux usuels. Des espèces répandues de granit contiennent 7 à 10 g/t d'uranium (certains minerais d'or sont exploités à 5 g/t). Des minéraux contenant 100 ou 200 g/t d'uranium ne sont pas rares (c'est le cas, par exemple, de certains gisements de phosphates).

Le problème industriel consiste à extraire de ces minerais l'uranium et le thorium, à « présenter » ces éléments sous une forme chimique convenable et à les mettre dans des dispositifs (piles atomiques) où a lieu la transmutation et le dégagement d'énergie. Celle-ci se manifeste toujours sous forme de chaleur. Nous ignorons encore si l'énergie atomique se laisse un jour domestiquer sous une autre forme; pour l'instant, les piles ne font que réchauffer des gaz ou des liquides, d'où la force motrice peut être tirée par des moyens classiques.

Ainsi présenté, le problème paraît simple. Il se complique du fait que, des trois espèces lourdes naturelles, une seule

(U 235) est fissile au sens pratique du mot (\*) (les deux autres — U 238 et Th 232 — ne le deviennent qu'après transmutation en Pp 239 ou U 233; on peut dire que dans leur état naturel elles ne sont douées que d'une « fissilité latente ») et que, d'autre part, cette seule espèce active ne nous est fournie par la nature qu'à l'état d'un mélange presque inextricable avec une quantité très prédominante d'U 238. Faut-il se résigner à ne développer qu'une technologie atomique de luxe, faisant appel à des combustibles très raffinés ? Ou viser avant tout à un abaissement du coût de ce raffinage ? ou s'adapter plus ou moins complètement aux inconvénients du combustible de base — l'uranium — tel qu'il nous est fourni par la nature et par l'industrie chimique classique ? Suivant que telle ou telle de ces préoccupations vient au premier plan, nous pouvons distinguer quatre grandes classes de foyers atomiques ou quatre voies d'utilisation des ressources naturelles :

1° La pile ne contient que de la matière fissile pure (U 235 ou Pu; possibilité prochaine : U 233) ou concentrée (par exemple, U 235 mélangé avec un peu de U 238 à la suite d'une séparation isotopique incomplète).

2° Le combustible est encore de la matière fissile riche, mais la pile contient aussi, dans un arrangement spatial approprié, de l'U 238 ou du Th qui est soumis au rayonnement neutronique. Il se forme ainsi du combustible nouveau en même temps que la charge initiale se consume : il y a « régénération » de la matière fissile. Si cette opération, comptabilisée en atomes fissiles, se solde par un bénéfice, on l'appelle en anglais « breeding ». Elle ouvre la voie vers l'utilisation totale de la « fissilité latente » et multiplie ainsi par un facteur énorme les disponibilités en combustible nucléaire.

3° Le combustible est de l'U naturel ou peu enrichi et, comme dans le cas précédent, on cherche à récupérer le Pu produit pendant la marche de la pile. Ici les relations spatiales entre les atomes d'U 235 et d'U 238 sont imposées par le choix même du combustible qui est abondant et très bon marché; mais l'arrangement n'étant pas optimum, une telle pile, dite à « double fonction », est beaucoup moins efficace qu'un « breeder ».

4° On brûle l'U naturel et on ne cherche pas à faciliter la récupération du Pu. On simplifie ainsi le problème technologique, mais on complique le problème économique (on oriente la production vers un produit très concurrentiel : la force motrice, la matière fissile n'étant plus qu'un sous-produit; alors que dans les piles double-fonction c'est le contraire qui a lieu).

### III. COMBUSTION DE LA MATIÈRE FISSILE PURE

Du point de vue de l'utilisateur, cette solution ne présente que des avantages. Toute la charge de combustible se réduit à quelques kg (dont chacun renferme en puissance 23 millions de kWh !); l'aisance du bilan neutronique permet l'emploi de presque n'importe quel matériau de structure pour les circuits d'évacuation de chaleur; le modérateur peut être constitué par de l'eau ordinaire ou même complètement supprimé.

Les inconvénients sont tous du côté de l'approvisionnement.

(\*) U 238 et Th, quoique fissiles dans un sens plus large, ne le sont pas assez pour donner lieu à une réaction en chaîne.

La matière fissile pure (\*) ne nous est pas fournie par la nature; elle doit être fabriquée dans d'immenses et coûteuses installations, dont la marche, dans l'état actuel de la technique, consomme des quantités énormes d'énergie « classique ». Au mieux, cette technologie nous apporte un nouvel « accumulateur » plutôt qu'une nouvelle source d'énergie; celle-ci est d'abord consommée dans une grande usine productrice, afin de constituer une réserve concentrée de combustible nucléaire qui, lui, peut être brûlé dans une installation compacte et même mobile, par exemple à bord d'un bateau.

Dans ces conditions, il était inévitable que le premier moteur nucléaire (abstraction faite de quelques démonstrations de principe, à faible puissance, qui ont eu lieu depuis décembre 1951 en Amérique) fût bâti pour le sous-marin *Nautilus*, lancé en 1954. Ici, l'avantage d'un combustible presque infiniment concentré prime tout et l'« accumulation » est payante même si le bilan énergétique global se traduit par un gaspillage.

Dispendieux en énergie, ce procédé l'est également en ce qui concerne la matière première fournie par la nature. Si l'on se contente d'extraire l'U 235, ou de le « convertir » dans des piles plutonigènes, on n'arrive à utiliser que quelques kg/t d'élément lourd, alors que d'autres procédés permettent une utilisation plus poussée (v. plus loin). On peut ainsi prédire qu'à la longue l'avenir de la combustion pure et simple de la matière fissile pure sera lié aux possibilités d'obtenir cette matière en tant que sous-produit des autres branches de l'activité atomique. Nous verrons tout à l'heure que le pronostic de ces possibilités est tout à fait favorable; il faut donc s'attendre à ce que la « première voie » continue à être suivie dans tous les cas où l'on tient, sans regarder au prix, à réaliser une installation atomique très compacte.

Les avantages de la simplicité et de la « flexibilité » technologiques joueront également : par exemple, le refroidissement par circulation de la matière fissile exige un combustible soit très enrichi, soit même pur. Le premier prototype, réalisé à Oak Ridge en 1953, de ce mode de refroidissement n'a produit que de l'énergie; il appartient donc, à titre expérimental, à notre « première classe ». Le deuxième réacteur homogène, prévu pour 1956, poursuit le même but; le troisième, prévu pour 1959, sera peut-être en mesure de fonctionner comme « breeder ». Ainsi les piles motrices à matière fissile pure, en plus de leur fonction propre, peuvent servir comme « bancs d'essai » pour des variantes technologiques inédites. Un rôle analogue a été joué par le moteur de *Nautilus* en ce qui concerne le refroidissement par eau sous pression.

Comme les « pays sans stocks » seront toujours enclins à diriger leurs faibles ressources en matière fissile pure vers les emplois les plus nettement rentables (tels que les classes 2 et 3), il est probable que c'est surtout dans les « pays avec stocks » qu'auront lieu les principales réalisations dans la 1<sup>re</sup> classe.

### IV. COUVAGE

Une pile dont la marche est dirigée délibérément vers la production de Pu à partir de l'U 238, ou de l'U 233 à partir du thorium, est une véritable « couveuse » où les atomes doués de fissilité latente sont amenés, par transmutation, à un état de fissilité franche. En l'absence d'un bon équivalent français pour le mot « breeding », la notion de couvage offre des possibilités terminologiques commodes.

(\*) Il est difficile de tracer une frontière entre « l'U 235 presque pur » et « l'uranium fortement enrichi ». Ce dernier combustible présente les avantages et les inconvénients de l'U 235 pur à un degré atténué.

**Couveuses à uranium.**

Une pile à matière fissile pure ou très concentrée est compacte parce qu'une fraction importante de sa population neutronique est disponible pour évaporation à la surface. Si l'on met une telle masse réagissante à l'intérieur d'une épaisse enveloppe en U 238, tous les neutrons évaporés s'emploieront à former du plutonium au sein de cette enveloppe. Le bilan neutronique, semblable en principe à celui qui régit le fonctionnement des meilleures piles à U naturel dirige leurs faibles ressources en matière fissile pure vers les (sur  $2\frac{1}{2}$  neutrons provenant d'une fission environ 1 est disponible pour l'absorption par U 238), représente une amélioration; en particulier, grâce à la séparation spatiale, il n'est plus nécessaire de ralentir les neutrons, ce qui permet de supprimer les pertes dans le modérateur et réduire les pertes dans les matériaux de structure.

La disponibilité pour la formation de Pu peut ainsi arriver à dépasser l'unité mentionnée ci-dessus; la quantité de matière fissile présente va ainsi en croissant du fait du fonctionnement de la pile. En « couvant » ainsi des quantités de U 238 qui, de cycle en cycle, croissent en progression géométrique, on peut, en principe, transmuter la totalité de l'U 238 disponible dans la nature. En même temps, la marche de la pile dégage de l'énergie qui, en principe, est utilisable.

Même pour les « pays à stocks », le couvage offre la seule possibilité de développer les usages type « première voie » sans que le combustible soit d'un prix prohibitif, ni soustrait à des stocks pour lesquels les Etats consentent des dépenses élevées dans une intention toute différente. L'existence des stocks permet quand même l'étude des moteurs-prototypes mentionnés plus haut. Cette dernière possibilité n'existe pas, ou presque pas, dans les « pays sans stocks ». Le développement du couvage constitue donc, pour ces derniers pays, une nécessité d'autant plus urgente. Le fait qu'il s'agit là d'un travail de très longue haleine n'est qu'une raison de plus pour commencer tout de suite, suivant le fameux principe énoncé par Lyautey.

L'expansion graduelle des stocks de plutonium produit par le couvage servirait d'abord à augmenter le nombre des couveuses elles-mêmes, qui deviendraient ainsi la source normale de force motrice tirée de l'uranium. Plus tard, il deviendrait possible de consacrer une partie des « bénéfiques » du couvage à l'utilisation directe dans les réacteurs brûlant purement et simplement la matière fissile pure. Il est intéressant de constater que le volume total de force motrice ainsi produite resterait toujours assez faible comparé à l'énergie totale tirée des couveuses dont le fonctionnement constituerait le « capital ». Ainsi, on voit que le couvage est la clé de tout l'avenir d'une énergie atomique vraiment économique et abondante. A la lumière des efforts actuels, cet avenir paraît prometteur, mais encore incertain. Une des plus grandes difficultés provient de la nécessité de soumettre la matière fissile à des épurations chimiques à mesure que les fragments des atomes fissionnés s'accumulent dans la masse réagissante. Une autre difficulté fondamentale est présentée par l'extraction de chaleur. W. H. Zinn (4) cite des projets comportant l'extraction de 0,5 à 1,5 mégawatts par kilogramme de matière fissile qui réagit au centre de la pile, alors que les grandes piles à uranium naturel qui fonctionnent aujourd'hui atteignent à peine quelques mégawatts par tonne d'uranium !

A l'heure présente (1954), seules des couveuses expérimentales à faible énergie existent à Arco (Etats-Unis) et Harwell (Angleterre). Des installations plus puissantes sont envisagées à Dounreay (Ecosse) et dans le cadre du Plan Quinquennal américain (Arco,  $62\frac{1}{2}$  mégawatts). Le fait que le coût de ce dernier projet est estimé à 40 millions de dollars est assez éloquant.

**Couveuses à thorium.**

Les perspectives offertes par le thorium ont, pour la première fois, été discutées dans le Plan Quinquennal américain. Il semble clair que le bilan neutronique d'un milieu (m. fissile pure + Th) est plus favorable que celui du milieu (m.f.p. + U 238) dans le cas où ces milieux contiennent également un modérateur et la chaîne est propagée par des neutrons *thermiques*. On comprend ainsi le désir américain de construire des couveuses à thorium en suivant la technologie, déjà bien familière, des piles à neutrons thermiques. Pour l'instant, il n'est pas clair si le thorium va aussi être utilisé dans des couveuses à neutrons rapides. Par contre, dès maintenant, le thorium est préféré pour les couveuses à matière fissile circulante (5) dont les formes actuellement étudiées comportent un ralentissement des neutrons.

Dans les couveuses à thorium actuellement envisagées, la matière fissile et la matière « fertile » (à couvrir) sont spatialement séparées, tout comme dans les couveuses à uranium. Certains projets (6) prévoient la possibilité d'un mélange de Th avec U 233. A première vue, cette proposition de reproduire fidèlement un état de choses qui, dans le cas de l'uranium naturel, est plutôt fâcheux, paraît surprenante; l'avenir montrera si elle est technologiquement justifiée.

Le thorium étant, dans la nature, plus abondant que l'uranium, son entrée sur la scène promet d'augmenter les ressources terrestres en combustible nucléaire par un facteur supérieur à 2. Pour l'instant, le couvage à uranium est partant avec plusieurs années d'avance, mais tout programme à longue échéance doit désormais comporter des études et des prototypes utilisant aussi bien le thorium que l'uranium.

**V. COMBUSTION DE L'U NATUREL DANS LES PILES A DOUBLE FONCTION**

Pour les « pays sans stocks », le perfectionnement et la multiplication des couveuses motrices représente le seul espoir de pouvoir participer un jour à des techniques qui consomment la m.f. pure. Leurs aspirations plus immédiates se tournent donc nécessairement du côté de l'uranium naturel. Pour les « pays avec stocks » le développement des techniques basées directement sur cette matière première est moins indispensable; il est d'autant plus intéressant de constater que, depuis 1952 environ, les Etats-Unis et l'Angleterre se sont résolument engagés dans cette voie. Nous verrons toutefois que leurs programmes ne sont pas transférables aux « pays sans stocks » sans une certaine adaptation.

Toute pile brûlant de l'U naturel produit à la fois du Pu et de la chaleur; étant donné leur bilan neutronique moins favorable que celui des couveuses, la production de Pu, atome par atome brûlé, ne peut jamais atteindre 1. Dans les meilleures conditions connues actuellement, elle arrive à un maximum de l'ordre de 0,8 à 0,9; une telle régénération incomplète est appelée « conversion », et les piles ainsi fonctionnant sont appelées « convertisseuses ». On peut bâtir une telle pile avec l'intention de favoriser avant tout la fabrication de Pu; le sacrifice de toute possibilité d'utiliser la chaleur dégagée permet de simplifier la construction et l'opération. Ce fut le cas des premières piles plutonigènes (Hanford 1944, Windscale 1951, Marcoule prévu pour 1956).

Pour passer de ce stade à celui d'une véritable pile « double-fonction » (à la fois plutonigène et motrice), il suffit en principe de porter le fonctionnement de la pile à une température plus élevée, de façon à ce que les calories emportées par le fluide refroidissant soient utilisables avec un rendement thermodynamique acceptable (de l'ordre de 300° au moins). Les matériaux de structure qui étaient employés dans les piles plutonigènes « froides » mentionnées

ci-dessus, ne suffisent plus; il faut employer des métaux nouveaux (notamment, le zirconium et l'acier inoxydable) et des structures plus robustes. Ceci augmente les pertes de neutrons et exige une technique nucléaire plus soignée : matériaux très purs, élément modérateur particulièrement peu absorbant. Dans ce dernier rôle, le graphite — dont l'affinité pour les neutrons est faible mais non négligeable — est à peine admissible; en fait, la possibilité même de construire une pile vraiment « chaude » à graphite et U naturel est encore discutable, tandis que la combinaison eau lourde-U naturel convient certainement, l'absorption des neutrons par l'eau lourde étant pratiquement nulle.

Si les partisans du graphite ne désarment pas et, en fait, dominant l'immédiat avec la centrale anglaise de Calder Hall et avec le réacteur de la North American Aviation Co. prévus tous les deux pour 1956, c'est que l'eau lourde présente deux inconvénients sérieux : son prix et la limitation thermique présentée par sa température critique (375°). Suivant la nature du fluide refroidissant, la compétition se présente de la manière suivante :

1° *Refroidissement par gaz comprimé.* Ce mode fut essayé pour la première fois dans la pile de Saclay (1952); le fait que cette pile, pour des raisons historiques (7) comporte l'eau lourde comme modérateur, ne diminue guère les chances de faire marcher ce système dans une pile au graphite. Toutefois, l'utilisation de l'uranium y est encore peu prometteuse (il faut en immobiliser 1 tonne pour assurer le dégagement d'environ 0,7 mégawatts-chaaleur) et les Anglais, voulant pousser vers 2 MW/tonnes introduisent des dispositifs qui arrivent aux limites du bilan neutronique valable dans un milieu C-U naturel (l'emploi possible de l'U enrichi — v. ci-dessous — est prévu d'ores et déjà). En somme, tant que ce mode, un peu primitif, est envisagé sans trop d'ambition, les avantages du graphite semblent l'emporter sur ses défauts, et son bas prix convient bien à des installations d'un rendement peu poussé.

2° *Refroidissement par eau.* La majorité des variantes prévoit une circulation d'eau sous pression (centrale atomique de Shippingport; pile canadienne N.R.U.; divers avant-projets européens). La « pile-bouilloire » de Zinn (8) a récemment ouvert une autre voie prometteuse. Le principal défaut de l'eau étant ainsi délibérément accepté du côté refroidissement, il n'entre plus en ligne de compte pour le choix du modérateur; le graphite perd ainsi un de ses deux grands atouts.

Eau ordinaire ou eau lourde? Seule cette dernière peut être employée avec l'uranium non enrichi; les « pays sans stocks » sont donc obligés d'y recourir. La situation est différente aux Etats-Unis où l'effet défavorable de l'eau ordinaire sur le bilan neutronique peut être remédié par l'enrichissement de l'uranium. Pour la pile de Shippingport cette solution a déjà été adoptée, tandis que pour la « bouilloire » du Plan Quinquennal la question semble rester encore ouverte.

Les pressions prévues vont jusqu'à 150 atmosphères (9). Les rendements par tonne d'U dépasseront certainement les 5 MW que la pile froide NRX de Chalk River a déjà atteints; le projet de Shippingport cite des chiffres, d'après lesquels le rendement prévu paraît être voisin de 15 MW/tonne. Le préambule du Plan Quinquennal spécifie expressément que ce projet, en principe, admet l'emploi de l'eau lourde et de l'uranium non enrichi.

3° *Refroidissement par métal liquide.* On pourrait concevoir une pile refroidie par l'eau sous pression et modérée au graphite, mais comme les fortes tuyauteries nécessaires affecteraient le bilan neutronique au delà des modestes possibilités du graphite, l'enrichissement de l'uranium devient

nécessaire. Une fois ce pas franchi, et le modérateur étant compatible avec les hautes températures, il devient intéressant d'employer un liquide doué de la même compatibilité. Le trio graphite-sodium-U enrichi devient ainsi une alternative logique de la conjonction D<sub>2</sub>O-U naturel et le dilemme entre les hautes pressions et les hautes températures (10) réapparaît dans le Plan Quinquennal américain (11).

Pour les « pays sans stocks » seules les solutions ne comportant pas d'enrichissement sont acceptables, car leurs maigres ressources en matière fissile pure suffiront à peine à l'indispensable étude du coulage et à la réalisation de quelques dispositifs expérimentaux. Pour illustrer à quel point la disponibilité des stocks affecte les manières de penser (et à quel point, par conséquent, il faut se garder d'appliquer ces manières dans des conditions modifiées), il est intéressant de signaler le constant emploi américain de l'expression « slight enrichment » à propos de la pile de Shippingport, alors que la quantité totale d'U 235 ajoutée à sa charge d'U naturel sera de l'ordre de 150 à 200 kilogrammes !

Nous arrivons à la conclusion logique que l'eau lourde offre, aux pays sans stocks, la seule possibilité de développer la combustion de l'U naturel dans de bonnes conditions de rendement en MW/tonne (12). Son prix doit être confronté avec celui de son concurrent technologique, l'U 235 employé pour l'enrichissement. D'après les données très incomplètes que l'on trouve dans les publications, il semble possible de dire qu'un kilogramme de D<sub>2</sub>O « remplace » une quantité de U 235 comprise entre 1 et 10 grammes; à raison de \$ 20 par gramme (13) on constate qu'une production accrue de l'eau lourde, en abaissant son prix actuel par un facteur raisonnable, l'amènerait à un niveau où la concurrence avec l'U 235 d'appoint deviendrait possible en termes purement économiques.

Nous venons de passer en revue les piles « chaudes » à U naturel (ou peu enrichi) et il nous reste à voir si l'exploitation de ces piles en « double-fonction » est intéressante. Là encore, le problème est différent suivant que le pays est « avec » ou « sans stocks ». Dans le dernier cas le plutonium est considéré comme précieux; il l'est même tellement que l'on est tenté tout d'abord de le produire dans des piles froides, afin de simplifier la construction et d'améliorer le bilan neutronique. Le recours aux piles chaudes (double-fonction orientées sur le Pu) ne devient intéressant qu'à un stade plus avancé de la technologie; plus tard, il sera sans doute supplanté par le coulage. Les voies de développement suivies actuellement dans les pays sans stocks semblent être assez proches de la marge ainsi délimitée; il n'est donc pas impossible que les piles convertisseuses double-fonction y jouent pour l'instant un rôle important d'autant plus que leur produit principal (Pu) subventionne en quelque sorte l'étude, importante pour l'avenir, de la production de force motrice.

Aux pays avec stocks, ainsi que nous venons de le voir, les piles chaudes à U naturel (ou presque) sont envisagées comme des consommatrices de matière fissile pure plutôt que des productrices. L'extraction de Pu permet, il est vrai, de compenser ou de « convertir » une grande partie de cette consommation; or, cette opération gêne l'exploitation des piles en tant que sources d'énergie (v. plus loin) et il reste à voir si le bénéfice réalisé sur le Pu arrive à couvrir l'élévation concomitante du prix de revient de l'énergie. Dans les descriptions qui nous parviennent des futures piles chaudes américaines et anglaises, l'intention de ne pas dédaigner le Pu est souvent proclamée (14), mais c'est le souci de produire l'énergie qui semble toujours dominer l'ensemble du projet, et c'est l'énergie seule qui en détermine la rentabilité.

## VI. PILES A U NATUREL PRODUISANT UNIQUEMENT DE LA FORCE MOTRICE

Si dans un projet de pile chaude, on se libère *initialement* de toute préoccupation quant à la récupération du Pu (quitte à y revenir *post factum*, s'il y a lieu), le problème comporte des caractéristiques qui feraient défaut dans un projet franchement double-fonction :

1° L'économie financière doit être surveillée de près, car on ne peut plus compter sur la vente d'un produit parallèle précieux. Même si un réacteur donné est construit à titre expérimental, c'est-à-dire sans chercher une justification économique immédiate, l'expérimentation doit porter sur des techniques qui promettent une telle justification dans les installations futures.

En particulier, l'eau lourde et les autres ingrédients coûteux, sans être exclus, ne doivent être employés qu'à bon escient.

2° Le bilan neutronique devient, au contraire, un peu plus flexible car l'intérêt de favoriser la formation de Pu devient moins pressant.

3° Il devient intéressant de prolonger le séjour de l'U dans le réacteur, alors que dans les piles plutonigènes la durée de ce séjour est soumise à des limitations (d'ailleurs différentes suivant que le Pu est ou n'est pas destiné à l'utilisation militaire).

L'effet du séjour sur une masse d'uranium dépend à la fois de sa durée et de l'intensité du rayonnement régnant à l'intérieur du réacteur. Son expression complète a la dimension d'une durée multipliée par une puissance par unité de masse : 1 MW-an/tonne est une unité commode. La même grandeur, que les Anglo-Saxons appellent « burnup » et que nous pourrions appeler « degré de combustion » s'exprime en pour-mille brûlé, c'est-à-dire en kilos d'U (235 ou 238 transmuté) fissionnés par tonne initialement présente (1 MWan/tonne correspond à environ  $\frac{1}{3}$  de 1 pour mille).

Le séjour de l'U dans la pile a pour effet de le charger en Pu et en produits de fission (ce qui, à la longue, affecte défavorablement le bilan neutronique); d'autre part, sous l'action des rayonnements, l'état métallique des lingots d'U s'altère et leurs gaines protectrices deviennent inefficaces. La nature des précautions à prendre ne devient claire qu'à la lumière de la pratique; il est tout à fait certain que, depuis les premiers jours de la technologie atomique, l'art de présenter l'U sous une forme qui résiste à ce genre d'usure a fait de grands progrès. La performance des « blocs combustibles » (fuel elements) reste aujourd'hui un des secrets les mieux gardés (15). Les projecteurs américains admettent actuellement la possibilité de faire subir à l'U une combustion d'environ 10 pour mille ou 30 MWans/tonne; ce chiffre est représenté comme une limite raisonnable des progrès qui restent encore à accomplir, plutôt que comme une technique déjà mise au point. Il est évident que toute performance inférieure augmente, en proportion inverse, le prix du combustible par kWh produit.

Après un tel séjour, l'U irradié et appauvri en U 235 peut — théoriquement — être traité chimiquement de façon à le débarrasser des produits de fission et de lui rendre son état métallographique initial. Si le Pu accumulé dans cet uranium y est laissé (ou, ce qui revient pratiquement au même, s'il est extrait et utilisé pour raviver la même ou presque la même quantité d'U appauvri), le combustible ainsi rajeuni peut fournir une autre tranche de 30 MWans/tonne. Ainsi la combustion à 30, 40, etc. pour mille devient théoriquement possible. Il est douteux, cependant, qu'un tel combustible régénéré arrive à concurrencer l'U frais, étant donné le coût des opérations chimiques nécessaires et il est probable d'autre part, que le Pu une fois extrait trouvera, en tant que m.f. concentrée, des rôles plus payants que celui de suppléer à U 235 dans son état de dilution naturelle.

En négligeant, dans leurs calculs de rentabilité, tout revenu de cette nature, c'est-à-dire en envisageant une exploitation strictement « simple-fonction », les projecteurs américains arrivent à des prix de revient de l'ordre de \$ 0,007 par kWh. La possibilité de concurrencer les sources classiques de force motrice est donc bien à peu près atteinte, mais sous les réserves suivantes :

1° Le rendement en MW/tonne doit être au moins comparable, et plus probablement supérieur, à celui du réacteur à U naturel le plus poussé qui soit aujourd'hui en service (Chalk River).

2° Le coût de construction doit être considérablement abaissé en comparaison avec celui des prototypes déjà réalisés ou en voie de réalisation. H. D. Smyth (16) cite l'exemple du réacteur de *Nautilus* dont la construction a coûté \$ 1.500-2.000 par kilowatt-force, alors qu'une centrale atomique capable de soutenir la concurrence devrait descendre aux environs de \$ 200 [cf. aussi (17)]. L'abaissement viendra d'une attention plus grande prêtée aux questions de rentabilité lors de l'étude du projet, des progrès technologiques de base, d'une expérience plus grande d'exécution et finalement d'une construction en séries plus étendues.

3° Les recherches métallurgiques et physico-chimiques doivent être poussées jusqu'à rendre possible la combustion à 1 % (30 MWans/tonne).

4° Les pays sans stocks doivent soit disposer d'eau lourde (en quantités se mesurant dès le début en dizaines de tonnes et à un prix comparable à celui de U 235 d'appoint, auquel elle supplée) soit développer une technique basée sur les bas rendements et les matières premières à bas prix (graphite, U traité et gainé aussi simplement que possible, refroidissement par gaz). Cette dernière alternative n'est mentionnée que pour mémoire, sa possibilité même étant problématique.

Les pays moins industrialisés que les Etats-Unis auront un avantage à créer des centrales atomiques même si celles-ci réalisent un prix de revient sensiblement supérieur à celui indiqué ci-dessus. Mais comme, dans ces pays, le prix des traitements chimiques, de la métallurgie et de la grosse mécanique risquent de dépasser les prix américains dans une proportion analogue, la situation concurrentielle reste en principe inchangée.

## VII. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans notre exposé nous nous sommes efforcés de faire ressortir la différence entre les pays « avec » et « sans » stocks de m.f. concentrée; au moment d'en arriver aux conclusions, il est évident que les recommandations quant à la marche à suivre pour développer l'industrie atomique se présentent, pour ces deux catégories de pays, d'une façon assez différente.

Aux Etats-Unis comme en Angleterre, les experts les plus hautement qualifiés ont élaboré les grandes directives du développement qui ont été mises en œuvre et fait l'objet (surtout en Amérique) de nombreuses divulgations officielles. Aussi bien aux Etats-Unis qu'en Angleterre, le couvage est proclamé comme l'objectif principal de l'évolution technologique; après les couveuses à faible énergie, déjà mises en marche, les premières couveuses productrices de force motrice sont en voie de réalisation. En même temps on construit les premiers réacteurs chauds, capables de fournir du courant électrique aux réseaux de distribution et consommant de l'uranium un peu enrichi plutôt que de l'uranium naturel. Cette dernière possibilité est étudiée d'une façon un peu théorique, alors qu'en pratique les « stocks » de m.f. sont mis à contribution. L'emploi de l'eau lourde n'est pas prévu dans l'immédiat, mais une grande capacité de sa production, existante (Amérique) ou en voie de réalisation (Angleterre et Nouvelle-Zélande) laisse entrevoir les utilisations futures. De nombreux réacteurs d'étude, tous consommateurs de m.f.



concentrée, ont été bâtis, surtout aux Etats-Unis, pour essayer les matériaux et les conceptions techniques inédites.

Les pays sans stocks, n'ayant pas accès à toutes ces ressources, doivent faire un choix entre les objectifs possibles; plus encore que leurs confrères plus fortunés, les techniciens de ces pays doivent faire preuve d'ingéniosité. Une nation peut se permettre de manquer de matière fissile, mais pas de matière grise.

Les principes suivants semblent découler logiquement de notre exposé :

1° Le couvage doit être considéré comme l'objectif de loin le plus important et toutes les ressources disponibles (notamment en personnel de première qualité) doivent y être consacrées en première priorité. La m.f. concentrée doit y être allouée avant de pouvoir servir les autres usagers, tels que les constructeurs de moteurs atomiques compacts. Si la m.f. fait entièrement défaut, des recherches préparatoires (métallurgie, échanges de chaleur, irradiation de matériaux) doivent être poussées en prévision des disponibilités futures.

Les réalisations à base d'U naturel doivent être entreprises en parallèle, mais il ne faut jamais oublier que ces techniques sont essentiellement prodigues de ressources naturelles et qu'à la longue seules les nations riches peuvent se permettre d'y recourir. La construction des piles à U naturel sera aidée, dans les pays sans stocks, par la possibilité plus prononcée de les exploiter en double-fonction et d'alléger ainsi leur financement. Ce facteur favorable, lui non plus, n'est sûr qu'à une assez brève échéance.

2° Il faut développer la recherche appliquée dans les domaines qui alimentent la technologie atomique; pour cela il faut multiplier les instituts, la variété des questions abordées et les possibilités, pour les spécialistes éminents, d'exercer leur influence éducatrice même si les sujets traités n'ont pas de rapport immédiat avec tel ou tel type de réacteur envisagé. Parmi les domaines en question, citons en premier lieu la métallurgie et le comportement des métaux aux températures et pressions élevées; le comportement d'autres matériaux; les phénomènes d'interface, y compris la corrosion; l'écoulement des fluides et de la chaleur; la physico-chimie des corps irradiés. La construction de réacteurs de laboratoire peut devenir nécessaire dans le cadre d'un tel programme, qu'il faut envisager sous une optique différente de celle qui présidera à la construction des piles productrices de force motrice.

Pour toutes ces activités de recherche appliquée, le contact le plus intime doit être créé entre les établissements scientifiques et l'industrie, allant jusqu'à la constitution d'équipes mixtes. Il s'agit là non seulement d'introduire les procédés industriels dans des installations (réacteurs, grands fours...) d'une complexité ou d'un calibre débordants; il faut songer aussi et surtout à la nécessité d'initier les milieux industriels aux idées et aux méthodes dont jusque là seuls les savants s'étaient préoccupés.

3° Les pays avec stocks, du fait même de leur état de possédants, sont amenés à restreindre leurs communications et à doser leurs divulgations. Les pays sans stocks profitent de ces contacts même restreints, et bénéficient de certains apports, en connaissances et en matériel. A en juger par l'expérience de ces dernières années, on peut s'attendre à ce que ces apports continuent d'arriver à une allure variable, probablement accélérée. Un seul renseignement nouveau, ou une seule facilité matérielle nouvelle, peuvent changer le sens de toute une recherche; il ne faut donc s'engager que dans des programmes flexibles, susceptibles d'importantes modifications en cours de route.

4° La capacité de production de l'eau lourde, accessible aux pays sans stocks, doit être très considérablement élargie; il faut penser dès le début en dizaines et très prochainement en centaines de tonnes par an. En expression de ce qui — peut-être — n'est qu'une prédilection personnelle, l'auteur de

ces lignes se permet d'évoquer l'exemple des aéroports que, partout, l'on élargit sans cesse — et jamais assez.

5° Ce qui compte pour l'avenir, c'est le progrès des connaissances plutôt que l'accroissement rapide des mégawatts installés suivant des méthodes primitives. Exception faite des pays les plus riches, et par conséquent déjà pourvus de stocks, une nation qui décide de se soustraire au partage des connaissances acquises, ne pourrait progresser que sur un nombre très restreint de voies — ou sur aucune, si elle s'obstine à les suivre toutes.

Les nations intéressées gagneraient donc à instituer des communautés de recherches — y compris celles sur le couvage et sur les sciences appliquées de base. Une telle communauté — par exemple groupant un petit nombre de pays voisins — ne devrait pas nécessairement suivre l'exemple du CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, sis à Genève) dans son programme de constructions entreprises en commun; le soin de bâtir les installations matérielles pourraient être judicieusement réparti entre les pays participants et ensuite la Communauté n'aurait qu'à assurer la mise en commun des connaissances et de l'accès aux installations nationales. Dans une telle structure, confédérale quant aux moyens et fédérale quant aux résultats, un seul réacteur « froid » pour essais de matériaux, une seule couveuse expérimentale suffiraient à plusieurs nations à la fois, alors que les premières stations productrices de force motrice pourraient être disséminées d'une façon plus large.

C'est en tirant ainsi le meilleur parti de leurs hautes forces intellectuelles et en usant du meilleur jugement pour choisir les voies les plus prometteuses, que les nations, actuellement défavorisées sur le terrain atomique pour des raisons économiques ou historiques, pourront à la fois assurer leur propre avenir atomique et contribuer efficacement au progrès universel.

#### BIBLIOGRAPHIE

1. « Report on the Five-Year Power Reactor Program, » U.S. Govt. Printing Office, mars 1954. Cette brochure est désignée plus loin par les initiales P.Q.
2. « Nuclear Reactor Development », volume publié par Atomic Industrial Forum, Inc., New York, en juillet 1954. Désigné plus loin par le mot Forum.
3. Voir par exemple L. KOWARSKI, *Electricité*, janvier 1954. Cette étude peut être considérée comme périmée dans une large mesure.
4. W.H. ZINN, dans *Forum*, p. 39.
5. P.Q., p. 14; *Nucleonics*, juillet 1954 (plusieurs articles); A.M. WEINBERG, dans *Forum*, p. 29.
6. CHAUNCEY STARR, dans *Forum*, p. 13.
7. L. KOWARSKI, *Nucleonics*, août 1954.
8. P.Q., p. 11; W.H. ZINN, dans *Forum*, p. 37.
9. C.H. WEAVER, dans *Forum*, p. 20.
10. Voir le rapport sur l'énergie atomique en France, dans le numéro commémoratif de *Nucleonics*, décembre 1952.
11. CHAUNCEY STARR, dans *Forum*, p. 11.
12. L. KOWARSKI, *Nucleonics*, décembre 1953.
13. W.H. ZINN, *Nucleonics*, septembre 1952 et *Forum*, p. 38.
14. Aux Etats-Unis: voir, par exemple, CHAUNCEY STARR, dans *Forum*, p. 13; en Angleterre: voir K.E.B. JAY, *Britain's Atomic Factories*, p. 83.
15. Voir, par exemple, *Forum*, p. 76.
16. H.D. SMYTH, dans P.Q., p. 22.
17. F.K. McCUNE, *Forum*, p. 65.

\* \* \*

Cette communication a donné lieu à l'intervention suivante :

**Intervention d'un congressiste.**

« L'éventualité de la production d'eau lourde au Congo belge est actuellement à l'étude. »

**FIN**