

PRÉSIDENCE DU CONSEIL

N° 3053

COMMISSARIAT A L'ÉNERGIE ATOMIQUE

I

VERS L'UTILISATION INDUSTRIELLE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

L. KOWARSKI

Rapport C.E.A. n° 274

1954

Centre d'Études nucléaires de Saclay

Service de Documentation

Boîte postale n°2 Gif sur Yvette (S et O)

L. KOWARSKI

Directeur au Commissariat à l'Énergie Atomique

Vers l'utilisation industrielle de l'énergie atomique



Extrait de la
Revue "ÉLECTRICITÉ"

N° de Janvier 1954

Vers l'utilisation industrielle de l'énergie atomique

Par

L. KOWARSKI

Directeur au Commissariat à l'Énergie Atomique

Nous avons eu le plaisir de publier au cours de l'année 1953 plusieurs articles sur les piles atomiques (*), rédigés par des Ingénieurs du Commissariat de l'Énergie Atomique, qui ont donné de très intéressants renseignements sur la construction, le fonctionnement et le réglage des piles.

A l'heure où toutes les nations envisagent les utilisations pacifiques de l'énergie atomique, nous sommes heureux de conclure cette série d'articles par une étude remarquable de M. Kowarski, l'un des spécialistes les plus connus, sur l'emploi des piles atomiques pour la production de l'énergie électrique. Il y fait le point avec précision des possibilités qui s'offrent actuellement à nous et de celles qu'on peut envisager dans un avenir prochain.

I. — Définition du sujet

On sait depuis 1939 que les atomes des éléments naturels les plus lourds peuvent, dans certaines conditions, subir la « fission », c'est-à-dire se casser en deux moitiés plus ou moins égales. Ces fragments sont projetés avec des vitesses énormes qu'ils perdent par chocs contre des atomes environnants. La quantité de chaleur ainsi engendrée se monte à 23 000 kWh pour un gramme de matière désintégrée (soit autant que la chaleur de combustion d'environ 3 t de charbon).

Des trois espèces d'atomes lourds qui nous sont fournis par la nature, deux (U 235 et U 238) se trouvent avoir la même charge nucléaire et sont, par conséquent, chimiquement inséparables. Leur mélange à l'état naturel contient toujours, par tonne, 7 kg d'U 235 et 993 kg d'U 238 ; la séparation n'est possible que par des procédés compliqués et coûteux basés sur la différence de masse. Ce simple fait détermine toutes les modalités de l'utilisation pratique de l'énergie contenue dans l'uranium (**).

La perspective de remplacer 3 t de charbon par 1 g d'uranium est d'autant plus tentante que l'uranium n'est pas un élément très rare : son abondance dans l'écorce terrestre est

(*) Les piles atomiques, par B. Jacrot, F. Netter, V. Ralevski, mars 1953. Contrôle des réacteurs nucléaires, par M. Surdin et J. Weill, mai et juin 1953.

Un quatrième article, dont la publication a été retardée pour des causes indépendantes de notre volonté et qui paraîtra prochainement sous la signature de MM. Surdin et Leduc, complétera cette série.

(**) Nous dirons, à la fin de cet exposé, quelques mots sur l'utilisation de la troisième espèce lourde naturelle (thorium 232). Dans l'état actuel de la technique atomique les possibilités de cette utilisation sont assez lointaines.

comparable à celle de certains métaux usuels. Des espèces répandues de granit en contiennent 7 à 10 g/t (certains minerais d'or sont exploités à 5 g/t). Des minéraux contenant 100 ou 200 g/t ne sont pas rares (c'est le cas, par exemple, de certains gisements de phosphates).

Le problème industriel consiste à traiter ces minerais de façon à en extraire l'uranium, à « présenter » cet uranium sous une forme chimique convenable, et à le mettre dans un dispositif (« pile atomique ») qui permet à la réaction nucléaire de se développer à une allure contrôlable.

A l'échelle industrielle, l'énergie atomique ne se manifeste que sous la forme de chaleur. Une pile atomique est un foyer qui peut servir à réchauffer des gaz ou des liquides. L'avenir montrera si l'énergie atomique se laisse domestiquer sous une autre forme ; pour l'instant on n'envisage que cette production de gaz ou de liquides chauds, d'où la force motrice (pour la propulsion ou pour la distribution par réseaux électriques) peut être tirée par des moyens classiques, avec un rendement qui croît avec la température du fluide à la sortie de la pile.

II. — Rappel des propriétés nucléaires de l'uranium

Ainsi présenté le problème industriel paraît simple. Il se complique du fait de la nécessité de partir d'une matière première (uranium naturel) où deux substances, douées de propriétés nucléaires très différentes, sont mélangées quasi-inséparablement. Rappelons les propriétés et les rôles respectifs de ces deux substances :

1° La fission de U 235 est beaucoup plus facile à provoquer

que celle de U 238. En fait, dans les dispositifs connus et utilisés aujourd'hui ou dans un avenir prévisible, l'intervention des agents capables de provoquer la fission d'U 238 n'est perceptible que dans une deuxième approximation. Pour les besoins du présent exposé, U 238 peut simplement être considéré comme « non-fissile », seul U 235 étant fissile.

2° Ceci, toutefois, ne veut pas dire que U 238 est un ingrédient purement inerte. En effet, la rencontre d'un atome U 238 avec un neutron peut produire l'atome instable U 239 qui se transforme assez rapidement (quelques jours en moyenne) en un atome de plutonium, élément qui n'existe pas dans la nature. Cet élément se laisse extraire par les moyens chimiques ordinaires, de la masse d'uranium où il a pris naissance. Le plutonium est fissile dans le même sens que U 235. Ce n'est que par cette voie très détournée que les 99,3 p. 100 de l'uranium naturel peuvent, en principe, être amenés à subir la fission. On peut dire que l'U 238 est doué d'une « fissilité latente » que seule la transmutation en Pu peut rendre effective.

3° Parmi les agents capables de provoquer la fission d'U 235, seul l'impact des neutrons nous intéresse dans cet exposé. Comme chaque fission s'accompagne de l'émission de 2 ou 3 neutrons (2 1/2 en moyenne), les neutrons jouent le rôle de porteurs d'une contagion qui permet d'amplifier le processus de fission, une fois amorcé, en boule de neige (« réaction en chaîne divergente »).

Pour maintenir la chaîne, il faut qu'en moyenne, sur les 2 1/2 neutrons issus d'une fission, un au moins puisse rencontrer un autre atome U 235. Cette condition est facile à réaliser si l'on dispose d'U 235 pur (séparé), car dans ce cas le neutron n'a que trois destins possibles : soit provoquer une fission, soit être absorbé dans U 235 sans qu'il y ait fission (cette probabilité est faible), soit quitter la masse par évaporation à la surface. En prenant une masse suffisamment grande, on peut réduire à volonté la probabilité de cette dernière alternative.

Par contre si l'on veut se servir de l'U naturel, sans séparation préalable des isotopes, la présence d'U 238 rend l'établissement de la chaîne beaucoup plus difficile. En effet, cet isotope n'étant fissile que sous réserve d'une transmutation préalable, les neutrons qu'il absorbe sont soustraits au bilan immédiat de la propagation.

4° L'absorption des neutrons par U 238 est, atome pour atome, beaucoup moins énergique que celle, productive, par U 235. Mais comme les 238 sont beaucoup plus nombreux, cette compétition est importante. Il se trouve que le bilan est d'autant plus favorable aux 235 que les neutrons sont plus lents au moment de leur rencontre avec l'un ou l'autre isotope. Pour cette raison, l'utilisation de l'U naturel exige la présence dans le milieu d'un grand nombre d'atomes légers, capable de ralentir les neutrons. Ces atomes doivent être choisis de façon à absorber eux-mêmes le moins de neutrons possible ; seuls les éléments D (hydrogène lourd), Be, C et O sont admissibles dans ce rôle.

L'amélioration du bilan due au ralentissement des neutrons est notable, mais l'absorption par U 238 reste appréciable. Dans les meilleures piles à uranium naturel, un neutron a à peu près autant de chance d'être absorbé par U 235 que par U 238.

5° Sur les 2 1/2 neutrons issus, en moyenne, d'une fission, un au moins doit rester disponible pour propager la chaîne ; une fraction à peu près égale étant absorbée par U 238, il reste seulement 20 p. 100 de tous les neutrons soit pour être absorbés dans les autres matières présentes (élément ralentisseur, fluide refroidissant, tuyauteries, etc.), soit pour s'évaporer à la surface de la pile. On voit la nécessité de réduire à l'extrême ce dernier risque de perte des neutrons. La masse minimum, mentionnée tout à l'heure à propos de la chaîne maintenue dans l'U 235 pur, devient donc beaucoup plus grande, si la même substance est utilisée dans son état de dilution naturelle par U 238. Quelques kg suffisent dans le premier cas, tandis que des dizaines ou des centaines de kg (c'est-à-dire des tonnes ou des dizaines de tonnes de mélange naturel) sont nécessaires dans les piles utilisant l'uranium naturel.

6° En séparant les isotopes incomplètement, ou en ajoutant de l'U 235 pur à l'U naturel, on obtient des mélanges isotopiques intermédiaires (plus de 7 kg d'U 235 par t) dits « uranium enrichi ». La chaîne est d'autant plus facile à établir (et la teneur totale de la pile en U 235 est d'autant plus faible) que le degré de l'enrichissement est plus élevé. A partir d'un certain degré on peut employer, comme élément ralentisseur, l'hydrogène ordinaire H malgré son affinité non négligeable pour les neutrons ; aux degrés plus élevés l'adjonction du ralentisseur devient de moins en moins nécessaire.

Le Pu peut remplacer l'U 235 comme agent enrichissant.

III. — Enoncé des voies possibles d'utilisation

L'exposé ci-dessus montre à quel point le sort réservé à l'U 238 domine les modalités techniques de la combustion nucléaire. On peut classer en quatre catégories les foyers atomiques actuellement existants ou en projet :

1° La pile ne contient que de la matière fissile pure (U 235 ou Pu), ou presque pure (cas de la séparation isotopique imparfaite : U 235 reste mélangé à une faible quantité d'U 238) (*).

2° Le combustible est de la matière fissile pure, mais la pile contient aussi, dans une zone distincte, de l'U 238 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 ». La première « breeder pile » a fonctionné « à perte » depuis l'automne 1951 jusqu'en été 1953. A cette dernière date on a réussi à équilibrer le bilan et si, en développant la technique, on arrive à le rendre bénéficiaire, alors la voie sera ouverte vers l'utilisation totale de la « fissilité latente » de l'U 238.

3° Le combustible est de l'U naturel (c'est-à-dire de l'U 235 dans son état de dilution naturelle) et, comme dans le cas précédent, on cherche à récupérer le Pu produit à partir de l'U 238 présent dans la pile. Une telle pile est dite à « double-fonction » (nom qui pourrait s'appliquer aussi aux breeders, les deux fonctions étant les mêmes dans les deux cas). Elle présente l'avantage de brûler un combustible abondant et bon marché, mais elle n'est pas aussi efficace qu'un breeder.

4° On brûle l'uranium naturel et on ne cherche pas à récupérer le plutonium (piles à « simple fonction »). Cette solution ne permet d'utiliser qu'une assez faible fraction de l'énergie potentiellement disponible.

IV. — Première voie :

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. La matière fissile pure ne nous est pas fournie par la nature ; elle doit être fabriquée — soit en extrayant purement et simplement l'U 235, soit en « brûlant » de l'U naturel dans des piles productrices de plutonium. Dans les deux cas il est nécessaire de bâtir d'immenses et coûteuses installations, dont la marche, dans l'état actuel de la technique, consomme des quantités énormes d'énergie « classique ». Au mieux, l'uranium ainsi

(*) 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. Pour les besoins du présent exposé, il est commode d'assimiler les combustibles employés, par exemple, dans les sous-marins américains, à de l'U 235 pur.

utilisé n'apparaît pas comme une source d'énergie, mais comme un « accumulateur » : l'énergie 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 un sous-marin (dont les premiers essais sont prévus pour le début de 1954). Ici, l'avantage d'un combustible presque infiniment concentré prime tout et l'« accumulation » énergétique 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 « transformer » 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 il est particulièrement important d'avoir une installation atomique très compacte. Les avantages de la simplicité et de la « flexibilité » technologiques joueront également ; il faut s'attendre à ce qu'ils perdent d'abord un peu de leur importance à mesure que la production de la force motrice nucléaire par les autres voies deviendra plus familière, mais dans un stade ultérieur on cherchera à s'affranchir des limitations inhérentes à ces autres voies et l'emploi de la matière fissile pure se généralisera. Dès maintenant on voit, par exemple, que le refroidissement par circulation de la matière fissile (déjà réalisée dans un prototype qui fonctionne à Oak Ridge depuis 1953) exige un combustible soit très enrichi, soit même pur. Or tous les experts reconnaissent aujourd'hui que ce mode de refroidissement est appelé à un grand avenir.

Les détails techniques des seules piles à matière fissile pure qui soient actuellement en construction ou en projet avancé sont tenus secrets. Etant donné la grande latitude permise dans le choix des matériaux de structure, les dispositifs de refroidissement les plus efficaces sont possibles : eau sous pression ou métaux liquides. Il semble possible d'extraire plusieurs mégawatts de chaleur par kg de matière fissile. (Les possibilités du refroidissement par matière fissile circulante sont encore très peu connues.)

V. — Deuxième voie : combustion et production simultanées de la matière fissile pure ("Piles couveuses")

Une pile à matière fissile pure 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. Ainsi précisé le bilan neutronique redevient semblable à celui qui régit le fonctionnement des meilleures piles à U naturel : sur 2 1/2 neutrons provenant d'une fission, 1 sert à maintenir la chaîne, environ 1 est absorbé par U 238 et environ 1/2 reste disponible pour les pertes diverses : matériaux de refroidissement et de structure, impuretés, etc. Le bilan neutronique est toutefois meilleur quand la matière fissile est spatialement séparée de l'U 238 : il n'est plus nécessaire de ralentir les neutrons, ce qui permet de supprimer les pertes par absorption dans le modérateur et de réduire les pertes dans les matériaux de structure ; enfin, certaines modalités du phénomène de la fission, qu'il serait trop long de discuter ici, contribuent à améliorer légèrement le bilan quand les neutrons ne sont pas très ralentis.

Une seule pile expérimentale de ce type existe en Amérique (et une autre est en construction en Angleterre). Le « breeder » d'Arco, Idaho, a déjà démontré son aptitude à fournir simultanément de la force motrice et du plutonium en quantité au moins équivalente (sinon pas encore sensiblement supérieure) à celle de l'U 235 consommée. Il est évident qu'en « couvant » ainsi la fissilité latente des quantités d'U 238 qui, de cycle en cycle, croissent en progression géométrique, ces piles « couveuses » (ce mot pourrait être adopté en absence d'un équivalent français commode du mot « breeding ») permettent en principe d'utiliser comme combustible tout l'uranium 238 disponible dans la nature. On ne connaît, ni entrevoit actuellement, aucune autre méthode pour atteindre ce même résultat.

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 des 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. Certains de ces fragments absorbent fortement les neutrons et leur présence met en déséquilibre le bilan neutronique. Il est important de comprendre que, même si les procédés pratiques d'un couvage rémunérateur étaient connus aujourd'hui (et nous sommes encore loin d'en être là), la multiplication auto-alimentée des piles couveuses prendrait des dizaines d'années. L'avènement des piles à la fois motrices et couveuses, marchant au plutonium et aux neutrons non modérés, est un phénomène probable mais encore lointain.

VI. — Troisième voie : production combinée de la force motrice et du plutonium à partir d'U naturel

En attendant cette ère définitive de l'utilisation généralisée et pleinement efficace de l'énergie atomique, les connaissances et les matériaux disponibles dès aujourd'hui permettent aux pays atomiques les plus avancés de se lancer dans la construction de piles qui brûlent de l'uranium naturel (ou, plus exactement, de l'U 235 dans son état de dilution naturelle) en produisant à la fois de la force motrice et du plutonium. Etant donné le bilan neutronique défavorable, imposé par la nature du combustible, la quantité de Pu, atome par atome brûlé, ne peut jamais atteindre ou dépasser 1 comme dans les couveuses ; dans les meilleures conditions connues actuellement elle arrive à environ 0,8. Cette régénération incomplète est appelée « conversion » et les piles ainsi fonctionnant sont appelées « convertisseuses ». Les premières piles plutonigènes (Etats-Unis : à Hanford, 1944 ; plus récemment à Savannah River ; en Angleterre : à Windscale, vers 1951) appartenaient déjà à cette catégorie ; mais comme la chaleur qu'elles produisent est délibérément sacrifiée, afin de simplifier la construction et l'opération, elles relèvent d'un niveau technologique inférieur à celui qui fait l'objet du présent article.

Pour passer d'une telle pile simpliste à une véritable pile « double-fonction », (motrice et plutonigène) 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 le

béryllium) 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.

Des évaluations précises — et d'ailleurs assez divergentes — du prix de revient de la force motrice obtenue à partir de l'U naturel ont été publiées en abondance. La conversion des calories chaudes en force motrice est, en principe, identique à celle qui a lieu dans les centrales thermiques ; seuls les coûts respectifs de la calorie sont à confronter : les piles seront certainement plus chères que les foyers brûlant du charbon, mais en ce qui concerne le prix du combustible lui-même l'avantage sera certainement du côté de l'uranium, même si son utilisation est très incomplète (voir ci-dessous). D'après les récentes données anglaises, une prévision modérément optimiste, et qui ne tient pas compte de la valeur du sous-produit (plutonium), conduit à des prix de revient de la calorie « légèrement supérieur » à ceux qui sont valables pour une centrale thermique au charbon. Des chiffres plus précis n'ont pas de sens, étant donné les deux incertitudes suivantes qui pèsent sur tous ces calculs :

a) il est encore difficile de savoir combien de kilowatts-chaleur il sera pratiquement possible de tirer d'une tonne d'U naturel investie dans la pile (cette donnée commande toutes les autres, car la masse des autres matériaux — modérateurs ou structurels — rapportée à la tonne d'U ne varie que dans des limites assez étroites). Ce rendement dépend avant tout du choix du fluide refroidissant ; les valeurs envisagées (voir Section VII ci-dessous) se situent entre 1 000 kW/t (refroidissement par un gaz comprimé) et 10 000 kW/t (refroidissement par un liquide) ;

b) la durée de la vie utile de l'uranium n'est pas connue non plus. L'idéal économique consisterait à laisser l'uranium dans la pile jusqu'à ce qu'une fraction importante de son U 235 soit brûlée et qu'une quantité presque équivalente de Pu soit formée. Au début de l'opération tous les atomes « brûlés » sont ceux de l'U 235, mais bien avant que la teneur initiale de U 235 (7 kg/t d'U total) tombe à moitié, le processus de fission commence à englober une proportion croissante de plutonium. Ainsi la valeur de la pile en tant que source de Pu commence à décroître. Des calculs ont été faits pour déterminer les conditions de cette évolution compte tenu de l'accumulation des fragments de fission, qui affecte le bilan neutronique.

Par ailleurs, sous l'action des rayonnements, l'état métallique de l'uranium s'altère, les lingots changent de forme, les gaines protectrices deviennent inefficaces. Une autre limite est ainsi imposée au « degré de combustion » (burn-up) d'une masse donnée d'uranium. Cette limite s'exprime de plusieurs façons suivant que l'on considère le nombre total de kilowatts-heure fournis par une tonne d'uranium (les mégawatts-année sont ici des unités plus commodes), ou simplement le pour-mille brûlé, c'est-à-dire le nombre de kg d'U fissionnés par tonne initialement présente.

Dans les premières piles plutonigènes il est probable que l'on retirait l'U de la pile après lui avoir fait fournir environ 1 MWan/t (ce qui correspond à environ 0.35 kg brûlés par tonne, ou 5 p. 100 seulement d'U 235 initialement présent converti en Pu). Les données trouvées dans la récente littérature anglo-saxonne laissent croire la possibilité de pousser le degré de combustion jusqu'à environ 10 MWans/t, soit 3,5 kg brûlés par tonne. D'après ce que nous avons dit plus haut, ce degré de combustion est atteint *avant* que la teneur initiale en U 235 diminue de moitié. Il semble, en somme, que les limites de fonctionnement imposées par l'état physico-chimique de l'uranium soient plus strictes que les limites purement nucléaires (*).

(*) D'après quelques indications, fort incomplètes, publiées dans la littérature américaine, il semble aussi que le degré de combustion admissible varie suivant que le Pu est, ou n'est pas destiné à l'utilisation militaire.

Une fois l'U retiré de la pile, et le Pu extrait, le résidu est trop pauvre en matière fissile et ne peut plus être utilisé dans les piles du même type. Il est évident que l'opération globale est d'autant plus rentable que le degré de combustion est plus élevé. Un effort technologique sera, probablement, encore nécessaire pour parvenir jusqu'à 10 MWans/t ; au-delà de cette valeur les gains supplémentaires en Pu diminuent rapidement.

Un curieux aspect de la technologie des piles double fonction est la possibilité — et dans certains cas peut-être la nécessité — d'y investir non seulement de l'U naturel mais aussi une certaine quantité de matière fissile additionnelle (soit en partant d'un uranium ayant subi un commencement d'enrichissement en U 235, soit en ajoutant un peu de Pu à l'U naturel). Il s'agirait d'une immobilisation relativement faible — peut-être 2 ou 3 kg/t d'U — que l'on récupérerait, d'ailleurs, intégralement après le traitement final de l'uranium. Ce faible enrichissement améliore suffisamment le bilan neutronique pour rendre possible la modulation par graphite. Dans ce genre de pile c'est la matière fissile additionnelle qui coûte cher, dans les piles U naturel-eau lourde, c'est le modérateur. Bien que c'est cette dernière solution qui, aujourd'hui, semble rallier toutes les préférences, des projets de piles double fonction à graphite et U enrichi ont été étudiés aux Etats-Unis.

Il est difficile de prédire l'avenir des piles double fonction. Elles ont été beaucoup discutées dans la littérature anglo-saxonne récente (1952-1953), mais il est évident qu'elles ne présentent d'intérêt que dans les circonstances assez étroitement délimitées. Si le plutonium est considéré comme très précieux, on sera tenté de le fabriquer dans des piles froides, afin de simplifier la construction et d'améliorer le bilan neutronique ; si, au contraire, le Pu est peu intéressant, on recherchera la force motrice à peu près exclusivement (v. ci-dessous). De même : dans les stades primitifs de la technologie atomique, les piles double-fonction seront coûteuses et peu intéressantes en tant que sources de force motrice ; si, au contraire, la technologie atomique est très avancée, on préférera les solutions plus efficaces telles que les piles couveuses. Les voies de développement atomique suivies actuellement en Europe continentale semblent être assez proches de la marge ainsi délimitée ; il n'est donc pas impossible que les piles convertisseuses double-fonction soient encore sérieusement considérées dans ces pays (ainsi que, peut-être au Canada), mais la raison de cette adoption sera technologique (absence d'autres sources de matière fissile pure), plutôt que financière (« le bénéfice réalisé sur le Pu permet de vendre la force motrice à un prix abordable »). Aux dernières nouvelles les Etats-Unis et l'Angleterre paraissent s'écarter de cette formule, ce qui montre que dans les pays qui disposent d'autres moyens de produire la matière fissile pure, l'argument financier est, à lui seul, inopérant.

VII. — Quatrième voie : piles à U naturel produisant uniquement de la force motrice

Toute pile contenant un modérateur de l'uranium naturel engendre nécessairement du plutonium comme sous-produit de son fonctionnement ; elle sera donc toujours « à double fonction », en donnant à cette définition son sens logique. La différence entre la technique considérée dans la Section VI et celle que nous allons décrire réside dans les détails et les attitudes plutôt que dans la conception fondamentale des piles.

Si l'on veut augmenter rapidement les ressources nationales en force motrice ou même seulement — pour commencer — acquérir rapidement des connaissances sur la production de force motrice, et si en même temps la matière fissile pure n'est pas considérée comme un produit rare et précieux, *comme tenu des autres sources d'approvisionnement* (aussi bien les Etats-Unis que l'Angleterre possèdent des piles plutonigènes spécialisées et des usines de séparation d'U 235), les données fondamentales du projet se modifient dans les directions suivantes :

1° Le problème du séjour de l'U dans la pile et de son traitement chimique subséquent se pose d'une façon toute différente.

D'une part, il n'y a plus aucune raison de limiter ce séjour à environ 10 MWans/t ; il faut au contraire rechercher tous les moyens pour le prolonger. D'autre part, le traitement chimique n'a pour but que de remettre l'uranium dans un bon état physico-chimique et de rétablir sa pureté initiale (enlever les fragments de fission accumulés). Le plutonium formé au sein de l'U durant son séjour dans la pile doit soit suivre l'uranium à travers les opérations de reconditionnement, soit — si ces opérations l'en séparent — être réincorporé à l'U avant que ce dernier soit remis dans la pile (v. ci-dessous).

2° Les budgets de construction et de fonctionnement sont plus stricts, parce que le côté créateur ne peut plus compter sur un sous-produit précieux. Le problème de l'emploi de l'eau lourde — restreint si elle reste à son prix actuel, généralisé si l'on arrive à abaisser ce prix — vient ainsi au premier plan des préoccupations.

3° Le bilan neutronique est, au contraire, plus flexible car il faut favoriser la formation du Pu devient moins pressant. Cette considération ne joue, toutefois, que dans les limites assez étroites. (Il est probable que la flexibilité augmente aussi à la suite du fait de la suppression des conditions spéciales — mentionnées par les Américains, mais tenues secrètes quant à leur nature — que l'emploi militaire éventuel du Pu impose à la marche des piles plutonigènes).

Tout pays industrialisé serait aujourd'hui en mesure de construire une pile produisant de la chaleur utilisable à partir de l'U naturel, à condition d'avoir accès aux matières premières (U, eau lourde, graphite pur...) et en n'utilisant que les connaissances technologiques « déclassées » (en les complétant, au besoin, par des observations sur des dispositifs d'essai relativement simples). La seule — et très importante — différence entre un pays très avancé tel que les Etats-Unis et un débutant tel que la Suisse serait dans le prix de revient des calories ainsi obtenues. Avec leur vaste connaissance d'une grande variété de piles, en fonctionnement ou en construction, et de matières premières, les Américains peuvent ramener le coût de la force motrice atomique à des niveaux que les pays moins avancés ne pourront pas atteindre dès leur premier essai.

Les techniques suivantes peuvent être envisagées dès aujourd'hui :

1°) Graphite et U naturel.

Le bilan neutronique ne laissant qu'une marge étroite, les dispositifs de refroidissement vraiment efficaces ne sont guère possibles. Le refroidissement par gaz comprimé (dont le seul prototype actuellement en service — la pile de Saclay — n'a pas encore épuisé toutes les possibilités potentielles) n'est guère régénératif que si le gaz circulant est très léger (la circulation en circuit fermé des gaz tels que N_2 ou CO_2 absorbe une puissance motrice appréciable). L'hydrogène présente des risques de corrosion qui paraissent prohibitifs ; l'hélium, au contraire, semble intéressant. Des puissances de l'ordre de 1 000 à 2 000 kW-chaleur par tonne d'U paraissent possibles dès maintenant ; avec le gaz sortant à 300° ou 350° et le rendement thermodynamique de 20 p. 100 (compte tenu de la perte à la recompression de l'hélium), une centrale de 50 mégawatts-force demanderait l'immobilisation de quelque 150 à 200 tonnes d'U.

La centrale que les Anglais construisent actuellement à Calder Hall rentre dans le cadre ainsi esquissé, pour autant que les renseignements publiés permettent d'en juger. La puissance prévue est d'au moins 40 mégawatts-force. Cette première réalisation marchera au CO_2 . Des projets d'avenir, plus ambitieux, envisagent l'emploi de l'hélium et une extraction allant jusqu'à 4 000 kW-chaleur par tonne.

2°) Eau lourde et U naturel.

Tous les moyens de refroidissement connus actuellement sont admissibles, la marge du bilan neutronique étant favorable. L'eau ordinaire en circuit ouvert, circulant sous pression le

long des masses gainées d'uranium, offre une solution évidente ; ses désavantages sont : la nécessité d'éliminer soigneusement tout risque de contact des deux eaux, et une certaine instabilité de fonctionnement nucléaire. Une pile « froide » de ce type a fonctionné à Chalk River (Canada) depuis 1948, et avec un grand succès, à peine remis en question par l'important accident subi par cette pile en 1952. Dès ce premier prototype, l'extraction de chaleur a pu atteindre 3 MW/tonne.

Dans les types plus évolués, l'eau sera mise sous pression lui permettant d'atteindre 200 à 250° ; elle circulera à travers la pile en circuit fermé, ce qui permettra de s'affranchir des inconvénients de l'eau ordinaire. L'extraction de 5 MW/t et même peut-être sensiblement davantage, deviendra possible. L'emploi des métaux fondus au lieu du courant d'eau lourde permettrait d'élever les températures, mais introduirait de nouvelles difficultés qui rendent l'emploi de ces métaux plutôt improbable dans les toutes premières réalisations (le problème se pose évidemment d'une façon très différente dans les piles à neutrons rapides). Le plus grand problème sera présenté par la corrosion des tuyauteries et des gaines, causée par la conjonction des agents chimiques et des rayonnements. La latitude neutronique offerte par l'emploi de l'eau lourde permettra d'employer les métaux appropriés, même si leur affinité pour les neutrons est relativement importante.

La pile « simple-fonction » dont la mise en construction aux Etats-Unis a été annoncée en octobre dernier (puissance prévue : « au moins 60 mégawatts-force ») appartient à ce type ; toutefois, pour des raisons probablement économiques et spécifiquement américaines, il semble que l'eau ordinaire sera utilisée à la place de l'eau lourde, le bilan neutronique étant rétabli par un faible enrichissement de l'uranium (v. ci-dessous).

3°) Graphite et U enrichi

Il s'agit d'un enrichissement peu prononcé, juste suffisant pour améliorer le bilan neutronique : on pourrait ainsi introduire les refroidissants liquides (H_2O , D_2O , métaux fondus) dans des tuyauteries adéquates, et pousser l'extraction jusqu'à 5-10 MW/t. L'enrichissement, même à quelques kg par tonne d'U naturel, est coûteux, mais l'élimination de l'eau lourde représente un avantage économique appréciable.

Des avant-projets de telles piles ont été étudiés aux Etats-Unis, mais aucune réalisation immédiate comportant le graphite ne semble être envisagée.

L'économie de la production de force motrice dans les piles « simple-fonction », plus encore que dans les « double-fonction » est liée au degré de combustion de l'uranium. Le coût des centrales à uranium par kilowatt-force installé est actuellement évalué à environ le triple de celui des centrales à charbon, soit à quelque \$ 500 (ordre de grandeur). Il faut tendre à un état de choses où le coût du combustible est complètement négligeable, ce qui serait évidemment le cas où un gramme d'uranium pourrait rendre son plein équivalent de 3 t de charbon (cette pleine utilisation n'est possible que par la voie du coulage ; voir Section V). A ce taux d'équivalence, même les opérations minières et métallurgiques qui, à la tonne d'U métal, paraissent coûteuses, ne peseraient qu'imperceptiblement sur le prix du kWh produit. (Certains experts américains admettent pour l'uranium, même tiré de sources peu économiques, un prix indicatif compris entre 50 et 100 dollars par kg/métal.)

Aujourd'hui on arrive à peine à utiliser l'uranium naturel à 1 ou 2 pour mille de sa masse initiale. Le séjour de la pile jusqu'à 10 MWans/t (combustion à 0,3 p. 100 ; v. plus haut) paraît cependant possible sans grand progrès nouveaux dans l'art de manier l'uranium métallique. Les experts les plus optimistes prévoient la possibilité d'arriver, grâce à de tels progrès futurs, jusqu'à 1 p. 100 (soit environ 30 MWans/t). Au delà, il y a la possibilité de reconditionner l'U et de le remettre, avec le Pu accumulé, dans la pile. Il serait imprudent de compter sur une utilisation totale, par cette voie, supérieure à 3 p. 100. Le nombre d'atomes présents dans un kg d'U diminue après chaque

passage de la pile ; après le premier passage, le remplacement d'U 235 par Pu est encore favorable au bilan neutronique, Pu étant un peu plus sensible aux neutrons, mais ensuite la réactivité du combustible décroît sans aucune compensation.

Après le dernier passage de la pile l'U contient encore du Pu qui peut être extrait et affecté à d'autres usages. Comme l'économie des piles « simple-fonction » présuppose que le Pu n'est plus un produit rare et précieux, le bénéfice retiré de cette opération n'a qu'une importance secondaire ; on pourrait l'affecter, par exemple, à compenser le coût des traitements chimiques successifs.

VIII. — Conclusion

Nous en arrivons à formuler l'essentiel dilemme de l'heure présente en ce qui concerne l'utilisation de l'uranium comme source de force motrice. La « première voie » n'a d'importance économique que dans un avenir éloigné ; la « troisième » n'est qu'une solution transitoire sans lendemain. Des deux qui restent, laquelle est préférable ? En d'autres mots, faut-il considérer l'uranium naturel comme une matière première, qu'une technologie très perfectionnée permet de transformer, presque à 100 p. 100, en un combustible concentré et flexible ? Ou, au contraire, faut-il « brûler » l'uranium à 2 ou 3 p. 100 au maximum, sous une forme presque brute, en acceptant tous les inconvénients et servitudes, mais sans avoir à attendre des mises au point techniques, dont le succès est probable mais encore incertain ? Poser cette question, c'est la résoudre : il faut faire les deux. A la longue, l'emploi de l'uranium s'amplifiant, et les ressources naturelles n'étant pas inépuisables, le rétrécissement de leur exploitation par un facteur 33 ou 50 ne sera pas toléré ; à une échéance plus rapprochée encore, la limitation aux piles à neutrons lents paraîtra intolérable. Mais pendant une période de transition et de développement qui durera au moins 20 ans, et peut-être 50, rien n'empêchera la mise en œuvre des techniques imparfaites, mais immédiates, basées sur l'uranium naturel.

Pour compléter le bilan des pour et des contre, deux considérations méritent d'être mentionnées :

(a) L'utilisation de l'uranium à 2 ou 3 p. 100 seulement ne veut pas dire qu'il faut s'attendre à un avantage *pécuniaire* énorme le jour où l'utilisation à 100 p. 100 deviendra possible. Si, dans les piles à utilisation imparfaite, le coût de l'uranium ne représente déjà qu'une faible fraction du prix du kWh (ceci semble déjà être le cas ; le gros de ce prix est constitué par le coût des installations), alors on ne gagne plus grand-chose en divisant ce poste par 33 ou 50.

(b) Les piles à uranium naturel sont complètement incapables d'utiliser le thorium, alors que cette utilisation semble être aussi facile (ou aussi difficile), par la voie du couvage, que celle de l'U 238. Le thorium étant, dans la nature, plus abondant que l'uranium, l'extension du couvage au thorium multiplie les res-

sources potentielles en matières fissiles par un facteur supérieur à 2. Les questions d'accessibilité locale de Th plutôt que d'U peuvent intervenir dans la discussion et inciter certaines nations à développer le couvage même si, par ailleurs, la combustion de l'U dans les piles « simple-fonction » leur paraît satisfaisante.

L'avance simultanée sur les deux voies principales présuppose l'accès à de nombreuses ressources telles que : matières premières, industrie chimique de transformation, laboratoires et ateliers de recherche appliquée dans de nombreux domaines (métallurgie, corrosion, hydrodynamique, thermodynamique), piles expérimentales diverses, installations de production de matière fissile (séparateurs d'U 235 ou piles plutonigènes). Sur ce dernier point, il est important de préciser que la matière fissile pure est évidemment nécessaire pour le développement du couvage et pour certains types de réacteurs compacts (qu'il faudra bâtir d'abord à titre exceptionnel et plus tard en prévision du « revenu » tiré des piles couveuses). Mais des quantités non-négligeables de matière fissile pure sont aussi très utiles pour développer la technique de l'utilisation de l'uranium *naturel* : l'étude du comportement des matériaux sous irradiation, pour être efficace et rapide, exige des réacteurs de laboratoire à très haute densité de rayonnement qu'il est commode de bâtir autour de petites quantités de U 235 ou de Pu ; par ailleurs, certains prototypes de piles qui doivent finalement marcher à uranium naturel sont plus faciles à mettre au point en usant provisoirement d'un combustible enrichi, alors que les problèmes d'un strict bilan neutronique n'ont pas encore été entièrement résolus (cf. l'exemple de la première pile américaine, mentionnée plus haut, destinée à la production du courant électrique).

Les pays anglo-saxons, qui sont déjà en possession de toutes ces ressources se sont d'ores et déjà résolument engagés sur la double voie de réalisations pratiques basées à la fois sur les neutrons rapides et les neutrons lents ; sur la matière fissile pure et sur l'uranium naturel. La France est en train de se constituer, sous l'égide du Plan Quinquennal en cours et sur une échelle proportionnée à l'ampleur de l'effort national consenti, un ensemble analogue de ressources.

C'est en 1956 ou 1957 qu'un réseau de distribution anglais ou américain recevra la première contribution de courant électrique provenant d'une centrale atomique ; et c'est au cours des décades suivantes que les deux voies actuellement choisies feront preuve de leurs mérites respectifs.

L. KOWARSKI.

Note bibliographique. — L'évolution des sujets traités dans le présent article étant très rapide, il est difficile de signaler des ouvrages ou des articles fondamentaux d'une validité durable. La revue spécialisée « Nucleonics », paraissant aux Etats-Unis, reçoit des contributions venant de nombreux pays et présente à chaque instant les éléments les plus récents du tableau d'ensemble.