

FILIERE EAU LOURDE - GAZ

par

Bernard BAILLY DU BOIS, Jean-Louis BERNARD

Roger NAUDET, Roland ROCHE

Rapport C E A - R 2691

Genève 1964, A Conf. 28/P/ 39

CEA-R 2691 - BAILLY DU BOIS Bernard, BERNARD Jean-Louis, NAUDET Roger,
ROCHIE Roland

FILIERE EAU LOURDE - GAZ.

Sommaire. -

La France, qui a basé son effort principal pour la production d'énergie nucléaire sur la filière des réacteurs à uranium naturel et graphite refroidis par gaz, et qui a un programme à plus long terme de réacteurs rapides, s'est engagée également dans le développement des réacteurs à eau lourde refroidis par gaz, qui semblent présenter les meilleures perspectives pour le moyen terme. L'économie de ces réacteurs, comme dans le cas du graphite, repose sur l'utilisation d'uranium naturel ou extrêmement peu enrichi. L'eau lourde permet d'en tirer le maximum d'avantages, tout en donnant lieu grâce à ses performances plus poussées à des perspectives de développement très intéressantes. Une centrale prototype EL 4 (70 MWe) est actuellement en construction : elle est décrite en détail dans un autre mémoire. La présente communication fait le point du programme consacré en France au développement de cette filière. . /.

CEA-R 2691 - BAILLY DU BOIS Bernard, BERNARD Jean-Louis, NAUDET Roger,
ROCHIE Roland

HEAVY WATER MODERATED GAS-COOLED REACTORS.

Summary. -

France has based its main effort for the production of nuclear energy on natural Uranium Graphite-moderated gas-cooled reactors, and has a long term programme for fast reactors, but this country is also engaged in the development of heavy water moderated gas-cooled reactors which appear to present the best middle term prospects. The economy of these reactors, as in the case of Graphite, arises from the use of natural or very slightly enriched Uranium ; heavy water can take the best advantages of this fuel cycle and moreover offers considerable development potential because of better reactor performances. A prototype plant EL 4 (70 MW) is under construction and is described in detail in another paper. The present one deals with the programme devoted to the development of this reactor type in France. . /.

On indique d'abord quelles sont les raisons qui ont conduit à choisir ce type de réacteur : on montre l'intérêt de la filière, en soulignant ses atouts et ses difficultés. Passant en revue les principaux problèmes technologiques et les travaux de développement qui leur sont consacrés, on analyse ensuite les résultats déjà acquis et les points restant à confirmer.

EL 4 est la première grande réalisation : sa construction constitue une étape importante, aussi bien du point de vue démonstration de performances que possibilités d'expérimentation et d'épreuve. Mais déjà se pose le problème de la conception d'une centrale de grande puissance unitaire. On a étudié à la fois l'adaptation ou l'amélioration des solutions mécaniques mises en oeuvre dans EL 4 et des variantes dont quelques-unes reposent sur des conceptions assez différentes.

On indique ensuite quelles sont les caractéristiques envisagées pour une grande centrale dans l'état actuel de la technique, compte tenu des études d'optimisation en cours. Des possibilités d'amélioration techniques existent ./.

Reasons for selecting this reactor type are given in the first part : advantages and difficulties are underlined. After reviewing the main technological problems and the Research and Development carried out, results already obtained and points still to be confirmed are reported.

The construction of EL 4 is an important step of this programme : it will be a significant demonstration of reactor performances and will afford many experimentation opportunities. Now the design of large power reactors is to be considered. Extension and improvements of the mechanical structures used for EL 4 are under study, as well as alternative concepts.

The paper gives some data for a large reactor in the present state of technology, as a result from optimization studies. Technical improvements, especially in the field of materials could lead to even more interesting performances. Some prospects are mentioned for the long run. Investment costs and fuel cycles are discussed in the last part.

CEA-R 2691 - Suite 3

d'ailleurs notamment en ce qui concerne les matériaux, ce qui pourrait conduire à des performances encore plus intéressantes. Quelques perspectives à plus long terme sont évoquées. Finalement on aborde les considérations économiques. On discute successivement les coûts d'investissements et les cycles de combustible.

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

FILIERE EAU LOURDE - GAZ

par

Bernard BAILLY DU BOIS, Jean-Louis BERNARD,
Roger NAUDET, Roland ROCHE

Commissariat à l'Energie Atomique

En décidant la construction d'EL 4, le C.E.A. s'est engagé dans une nouvelle filière, celle des réacteurs modérés par eau lourde et refroidis par gaz carbonique. Cette filière est conçue comme devant constituer un programme à moyen terme. Elle s'inscrit en effet logiquement entre les réacteurs à graphite-gaz qui en sont au stade industriel et qui vont former la base du programme d'équipement électro-nucléaire français dans les années qui viennent, et les réacteurs rapides qui sont étudiés dans une perspective à beaucoup plus long terme.

Même dans les hypothèses les plus optimistes, le développement des surgénérateurs ne peut certainement pas avoir pour conséquence un arrêt rapide de l'équipement en réacteurs thermiques et on doit considérer que ceux-ci ont devant eux un avenir étendu. Il était donc sain de ne pas s'enfermer dans une seule formule de réacteur thermique, mais au contraire de rechercher des possibilités nouvelles de développement, à condition que ceci n'entraîne pas une dispersion exagérée des moyens d'études disponibles. La filière eau lourde-gaz offre à ce point de vue des perspectives particulièrement intéressantes.

1° - ATOUPS ET DIFFICULTES

a) Pourquoi ce type de réacteur ?

L'eau lourde comme modérateur, grâce à ses excellentes propriétés neutroniques, permet à la fois d'atteindre des performances poussées, en particulier en puissance spécifique et en taux de combustion, et en même temps d'utiliser de l'uranium naturel ou extrêmement peu enrichi. Il s'agit donc d'un type de réacteur que l'on peut qualifier d'"avancé" par ses performances et ses potentialités mais qui en même temps conserve la forme d'économie de combustible des réacteurs à uranium naturel, et même en exploite au maximum les avantages.

L'utilisation d'uranium naturel permet de faire appel à un combustible aux sources d'approvisionnement multiples et donne lieu à un cycle particulièrement avantageux lorsqu'on a la possibilité de l'irradier très longtemps, comme c'est le cas pour les réacteurs à eau lourde, dans la mesure où on peut éviter de détériorer le bilan neutronique par les matériaux présents dans le coeur. Rappelons ses deux principaux avantages :

- il s'agit d'un cycle simple, qui n'exige que des investissements modérés, des installations peu complexes, et dont l'économie ne comporte que très peu de facteurs d'incertitude (il n'est pas nécessaire de retraiter le plus rapidement possible le combustible irradié).

- le coût de la matière fissile consommée par kWh produit est extrêmement faible : en effet les noyaux d'uranium 235 contenus dans l'uranium sont presque tous utilisés et ils coûtent nécessairement beaucoup moins chers que ceux qui seraient rajoutés par une usine de diffusion ; en outre la quantité d'énergie tirée de chaque gramme consommé est au moins deux fois plus grande que celle provenant directement de la fission, du fait de la combustion "in situ" d'une grande quantité de plutonium. La contribution du coût du combustible dans le coût du kWh est par suite plus faible en principe que dans tout autre réacteur.

Grâce à cette excellente utilisation du combustible, les réacteurs à eau lourde sont d'autre part ceux qui consomment le moins d'uranium en tant que matière première pour produire une quantité donnée d'énergie ; ils seront donc très peu affectés par le renchérissement de l'uranium, conjoncture prévisible dans un avenir plus ou moins éloigné. (On ne fera que mentionner la possibilité de

fonctionnement en breeder par utilisation de thorium, qui pourrait constituer à plus long terme une solution de rechange à l'éventuel problème de l'épuisement des réserves d'uranium à bas prix).

Si on compare les performances des réacteurs à eau lourde à celles d'un réacteur graphite-gaz, du type EDF 4 par exemple, on peut noter qu'il est possible de gagner sans difficulté un facteur cinq sur la puissance spécifique (MW produits par tonne d'uranium), un facteur huit sur la puissance volumique (MW par mètre cube de coeur) et un facteur six sur le nombre de canaux. D'une manière générale les réacteurs à eau lourde, parce qu'ils représentent une technique plus avancée et offrent beaucoup plus de souplesse et d'adaptabilité, présentent des avantages potentiels qui pourraient apparaître très importants à l'avenir.

Pourquoi avoir choisi, parmi les modes de refroidissement envisageables, le gaz carbonique ? Ce choix a été la conséquence d'un ensemble d'études préliminaires, qui bien entendu n'ont pas permis de trancher de façon décisive, mais ont mis en évidence un certain nombre d'atouts de cette formule qui nous ont paru importants à moyen terme. Cette voie avait en outre pour nous l'avantage de se situer dans le prolongement du programme des piles à graphite.

A condition d'utiliser des pressions de gaz suffisamment élevées et de mettre en jeu des écarts de température entre gaines et gaz suffisamment grands, il n'y a aucune difficulté pour extraire toute la puissance compatible avec les limitations propres de l'oxyde d'uranium : on aboutit de ce fait à des géométries de coeur, des densités de puissance, et des bilans neutroniques tout à fait comparables à ceux obtenus par exemple dans le cas du refroidissement par eau lourde.

Les études de sûreté ont montré que le refroidissement par gaz conduit, même en cas d'accident maximum, à des conditions très acceptables et finalement moins critiques que lorsque le refroidissement est assuré par un liquide dans les conditions normales de fonctionnement. Du point de vue économique, bien que les circuits extérieurs soient volumineux, les coûts ne sont pas particulièrement élevés ; ils sont d'ailleurs abaissés par accroissement de la pression, et on bénéficie de la relative rusticité du circuit primaire.

Une des préoccupations essentielles a en effet été de répondre le mieux possible aux exigences d'une exploitation industrielle ; il nous a semblé important de remplacer par un fluide bon marché

l'eau lourde du circuit du refroidissement, qui donne lieu à des risques de perte et de pollution, demande de nombreuses précautions et rend l'entretien compliqué à cause du tritium. En outre l'orientation vers les températures élevées permises par le gaz conduit à des conditions de vapeur assez proches de celles qui sont admises dans les centrales modernes ; on évite ainsi d'introduire des complications dans le cycle ou d'utiliser du matériel de conception périmé.

D'une manière générale, comme on le montrera plus loin, le refroidissement par gaz nous a semblé comporter davantage de potentialités pour l'avenir, en particulier parce qu'il peut bénéficier plus que tout autre ou d'une façon plus directe de l'amélioration constante des matériaux.

b) Les problèmes et leurs solutions

Un important programme de recherche et développement a été lancé au début de 1959 sur les problèmes les plus difficiles posés par ce type de réacteur ; entre cette date et la fin 1963, environ 80 millions de francs ont été dépensés pour ce programme, non compris bien entendu les contrats d'études industrielles passés dans le cadre de la construction d'EL 4.

Parmi les problèmes propres à cette filière, les plus importants sont ceux qui ont trait aux structures internes du réacteur et au combustible ; on ne mentionnera que pour mémoire les problèmes liés à la conception mécanique de la cuve et des collecteurs, aux circuits extérieurs, au contrôle et à la sûreté ; de nombreuses études ont été consacrées en particulier à ce dernier point, les plus importantes concernant les conséquences de l'éclatement d'un tube de force et les phénomènes thermiques transitoires en cas de dépressurisation rapide des circuits.

I - Les structures du réacteur

On a choisi de faire tenir la pression du gaz par des tubes de zirconium ; ceux-ci à cause de la température élevée du CO_2 doivent de toute façon comporter un isolement thermique interne ; l'isolement dont l'efficacité n'est pas facile à réaliser à cause de la pression du gaz, est limité vers l'intérieur par un tube de guidage qui doit être transparent aux neutrons et résistant à température élevée ; le raccordement entre les tubes en zirconium et la cuve et les circuits extérieurs en acier est lui aussi particulièrement complexe.

Tous ces problèmes, qu'il fallait mener jusqu'à un stade de fabrication industrielle de série, ont paru extrêmement difficiles au début des études. Ils sont maintenant résolus de manière entièrement satisfaisante et sûre [1]. On dispose même de deux solutions différentes pour les jonctions et parmi plusieurs solutions possibles pour l'isolement thermique deux d'entre elles donnent dès maintenant entière satisfaction.

Les caractéristiques neutroniques et thermiques admises pour EL 4 sont déjà très intéressantes : le tube de force qui n'a que 3 mm d'épaisseur offre un coefficient de sécurité très supérieur aux normes usuelles ; la capture neutronique de l'ensemble tube de guidage et isolement thermique est équivalente à celle d'un tube d'aluminium de 1.2 mm d'épaisseur ; une température de sortie du gaz de 500° est admissible, moins de 2 % de la chaleur passent dans le modérateur par fuite thermique. Or déjà des progrès sur les matériaux permettraient des performances meilleures : les nouveaux alliages de zirconium au niobium rendront possible une forte augmentation du taux de travail dans les tubes de force ; on étudie d'autre part des formules d'isolement thermique moins capturantes et des matériaux pour le tube de guidage plus résistants au fluage sous température élevée.

II - Le combustible

Le combustible est constitué par des grappes comportant un certain nombre de crayons d'oxyde d'uranium (19 dans EL 4). Trois séries de problèmes se posent successivement : ceux concernant l'oxyde (en particulier la rétention des gaz de fission), ceux concernant le crayon (mise au point d'un matériau de gainage transparent aux neutrons et résistant à haute température - comportement sous cyclage thermique), enfin ceux concernant la grappe (comportement sous des sollicitations variées - problèmes aérothermiques).

Le choix du béryllium comme matériau de gainage impliquait des études assez longues ; on a donc décidé d'utiliser pour la première charge du réacteur un combustible provisoire de conception plus classique et on a retenu pour ce dernier le gainage en acier inoxydable, les problèmes d'assemblages étant par ailleurs facilités par l'utilisation d'une chemise de graphite qui supporte les efforts longitudinaux. Ce combustible provisoire peut être considéré aujourd'hui comme bien au point [2] : les irradiations de crayons et les essais hors pile ont été satisfaisants, les essais dans les boucles

du réacteur Pégase au cours du deuxième semestre 1964 apporteront une confirmation définitive dans les conditions réelles de fonctionnement.

Un programme de recherche considérable a été consacré à la mise au point du gainage béryllium, et des résultats extrêmement intéressants sont maintenant acquis. On renvoie à ce sujet à une autre communication présentée à cette conférence [3]. Après la résolution des nombreux problèmes de fabrication courante (obtention d'un métal suffisamment pur - conditions d'élaboration reproductibles - tolérances de filage convenables - mise au point d'un procédé de soudage satisfaisant), la principale difficulté résidait dans la faible valeur de la ductilité transversale, spécialement aux environs de 250°. Des progrès décisifs ont été réalisés puisqu'on a atteint des facteurs 15 à 20 d'amélioration sur les allongements transversaux dans ce domaine de température. Les expériences en pile ayant montré par ailleurs que les exigences pratiques en matière de ductilité ne sont pas aussi draconiennes que pourraient le montrer des calculs trop élémentaires, on est en droit d'être actuellement très optimiste en ce qui concerne le comportement des crayons, même après de fortes irradiations. Enfin le dernier problème posé par le béryllium, celui de la corrosion en présence de vapeur d'eau, a été résolu grâce à l'adjonction de faibles teneurs de calcium, un fonctionnement à température nominale de 625° ne causant plus d'inquiétudes.

On se trouve maintenant, concernant le combustible béryllium, dans la situation suivante : les problèmes posés par le crayon élémentaire sont pratiquement résolus, et les équipes et moyens d'essais consacrés à l'étude du combustible provisoire sont disponibles pour la mise au point des structures d'assemblage ; des irradiations représentatives de grappes pourront commencer prochainement dans le réacteur d'essais Pégase. On peut donc envisager d'utiliser des combustibles représentatifs de la filière dans le réacteur EL 4 peu après sa mise en service.

Par ailleurs la mise au point d'alliages de zirconium résistant à la corrosion du CO² à haute température constitue une solution de rechange qui peut se révéler très intéressante. Des études se poursuivent sur cette solution qui permettra de s'adapter dans les meilleures conditions aux variations de la conjoncture technico-économique.

2° - D'EL 4 AUX CENTRALES FUTURES

a) EL 4 première grande réalisation

EL 4 est un projet assez ambitieux pour une première réalisation. Il a semblé nécessaire en effet de le concevoir de manière à pouvoir en tirer un enseignement suffisamment valable pour apprécier pleinement les possibilités de ce type de réacteur. On s'est efforcé d'aborder tous les problèmes fondamentaux, et de leur apporter au moins l'amorce d'une solution définitive [4].

Par exemple on a imposé aux tubes de force toutes les spécifications désirables au point de vue démontabilité, encombrement, tolérances, capture neutronique, etc. De même on a tenu à faire le déchargement en marche. Dans le même esprit, on a estimé nécessaire que les caractéristiques de fonctionnement (puissance spécifique, températures..) soient représentatives des caractéristiques finales. Enfin la réalisation est à une échelle suffisante pour que certains problèmes soient posés en vraie grandeur et que l'expérience industrielle et opérationnelle qu'on en tirera soit elle aussi significative.

Cependant sur bien des points, dans des secteurs moins fondamentaux, on a préféré pour ne pas multiplier les risques inutiles, choisir des solutions relativement confortables et sûres plutôt que de rechercher l'économie maximum comme on le ferait dans une centrale qui devrait être compétitive. Il en est ainsi par exemple pour les circuits ^{du} modérateur, pour les installations auxiliaires, ou pour le cycle thermodynamique pour lequel on n'a pas recherché le meilleur rendement mais au contraire le minimum de complication. De même on a préféré que les faces du réacteur soient accessibles en marche et que la machine de chargement soit entièrement protégée ; on a multiplié les sécurités et prévu une troisième soufflante pouvant être couplée à tout moment ; on a recherché l'accessibilité en compartimentant les différents sous-ensembles.

En outre on a donné à cette réalisation un assez large caractère expérimental de manière à pouvoir en tirer le maximum d'enseignements ; sur un certain nombre de points plusieurs solutions sont essayées en parallèle ; les moyens de contrôle du réacteur sont surabondants, les mesures sont très nombreuses et on a prévu un traitement des informations d'assez vaste capacité.

b) Les études "de filière"

Dans les centrales futures l'accent sera mis sur l'économie autant que sur la sécurité de fonctionnement. Il reste donc à rechercher dans tous les domaines des perfectionnements ou des solutions plus simples ; un certain nombre de points laissés de côté dans EL 4 sont d'ailleurs à revoir et le passage à de grosses unités nécessitera parfois des solutions un peu différentes. Enfin, bien qu'on n'ait pas lieu en général de regretter les options faites pour EL 4, il nous a semblé utile de les remettre systématiquement en question au stade des études de conception pour en examiner à nouveau toutes les incidences [5].

Ces études portent essentiellement pour le moment sur l'agencement mécanique du réacteur et de ses annexes, à l'échelle d'une centrale de 500 MWe. Il est apparu par exemple que la conception des tubulures d'alimentation devra être modifiée afin de ne pas allonger exagérément les délais de montage lorsque le nombre de canaux devient plus élevé. De même la construction de la cuve pose d'assez nombreux problèmes et plusieurs solutions sont examinées ; en particulier on étudie des solutions où les faces de chargement ne seraient accessibles qu'à l'arrêt du réacteur. Enfin un certain nombre de variantes concernant la manutention du combustible et le contrôle du réacteur méritent d'être examinées très à fond.

Ces études portent en principe sur un type de solution découlant directement d'EL 4, c'est-à-dire à tubes de force horizontaux. Cependant on a réexaminé une solution à tubes verticaux, cette option ayant des conséquences très importantes dans presque tous les domaines. Bien que cette discussion ait confirmé les raisons de notre préférence pour l'horizontalité, il n'est pas possible de dresser un bilan définitif ; en fait on rencontre des difficultés de nature différente. L'enjeu le plus important est le combustible, qui en particulier est soumis à des conditions moins satisfaisantes de renouvellement et de manutention. Aussi longtemps que l'on n'aura pas d'éléments nouveaux permettant de mieux apprécier les problèmes de combustible, il nous semble que la meilleure règle à suivre est la continuité avec EL 4.

En ce qui concerne les caractéristiques de fonctionnement, on a réfléchi sur les incidences d'un accroissement de la pression du gaz : celui-ci, rendu possible en particulier par l'amélioration du taux de travail dans les tubes de force est avantageux à de

nombreux points de vue, mais il faut examiner soigneusement tous les problèmes connexes ; il ne devrait pas y avoir de difficulté en tout cas jusqu'à 80 kg/cm². Enfin l'amélioration éventuelle des échanges de chaleur par des corrugations de gaine ou la présence de quelques ailettes vrillées est précisée par des études aérothermiques ; cette question est en réalité liée de très près à la conception de l'assemblage du combustible.

c) Etudes et perspectives à plus long terme

Il n'est pas interdit de réfléchir en vue d'un avenir un peu plus éloigné. On ne fera que mentionner une étude de réacteur à quatre faces de chargement, comportant deux directions de canaux horizontaux entrecroisés : cette disposition pourrait se révéler avantageuse pour de très grandes puissances unitaires (≥ 1000 MWe). On a d'autre part examiné ce que pourrait être la transposition de la solution étudiée pour les réacteurs à graphite (projet INCA) : caisson en béton précontraint, système primaire intégré, chargement intégré en grémier. Cette conception (à tubes verticaux bien entendu) a le mérite de simplifier énormément les circuits, de réaliser une très grande compacité et de supprimer l'enceinte étanche : il reste à savoir si les problèmes de maintenance peuvent trouver une solution satisfaisante. Il n'est pas question de réaliser un réacteur à eau lourde de ce type avant d'avoir retiré le bénéfice de l'expérimentation industrielle des réacteurs à graphite totalement intégrés ; par conséquent les études actuelles dans cette voie n'ont qu'un caractère exploratoire.

En ce qui concerne le combustible, on a examiné les avantages qui résulteraient de l'utilisation de l'oxyde d'uranium en plaques ou en tubes concentriques. Ceci poserait bien entendu des problèmes technologiques nouveaux et exigerait une expérimentation préalable en pile. De même on a examiné la possibilité d'utiliser le carbure d'uranium : ce matériau en effet a vis-à-vis du CO² une affinité beaucoup moins grande que vis-à-vis de l'eau, et sous réserve de vérifications supplémentaires concernant l'évolution des ruptures de gaines à haute température, son emploi pourrait être envisagé. Il en résulterait alors simultanément un accroissement très sensible de performances (en puissance spécifique) et une simplification du combustible.

On mentionnera enfin deux études qui conduiraient à révolutionner les circuits extérieurs : d'une part l'utilisation comme refroidisseur d'une suspension de graphite dans le CO_2 , l'amélioration considérable de la capacité calorifique permet en particulier de gagner en puissance de soufflage : un contrat d'études a confirmé l'excellent comportement de ce "fluide". Par ailleurs des études sur les turbines à gaz en cycle direct ont montré qu'à condition d'adapter convenablement le cycle thermodynamique (détente partielle après récupération), il serait possible même avec une température de sortie ne dépassant pas 520° d'atteindre un rendement satisfaisant avec des matériels très réalisables industriellement et des circuits simplifiés.

3° - CE QUE POURRAIT ETRE UNE GRANDE CENTRALE

La réalisation en France d'une nouvelle centrale eau lourde-gaz comporterait bien entendu de nombreuses modifications de détail par rapport à EL 4 mais les innovations seront sans doute limitées en ce qui concerne les grandes options. Il est probable par ailleurs que la puissance pour cette prochaine étape sera de l'ordre de 300 MWe ; néanmoins c'est à l'échelle de 500 MWe que sont définies pour les études les caractéristiques d'un réacteur de référence, telle qu'il peut être imaginé actuellement par simple extrapolation d'EL 4.

a) Principales caractéristiques

Les valeurs numériques données ci-après ne le sont qu'à titre indicatif ; elles n'ont aucun caractère définitif.

La principale modification par rapport à EL 4 réside dans l'adoption d'une grappe comportant un nombre plus grand de crayons (31) ; l'accroissement de la quantité d'uranium par canal est en effet nécessaire pour ne pas augmenter exagérément le nombre de canaux. L'intégrale de conductivité est prise égale à 33 W/cm (EL 4 : 29 W/cm). On a supposé que la pression était portée à 75 bars, le taux de travail dans les tubes de force étant accru par rapport à EL 4 grâce à l'adjonction de niobium : il en résulte une puissance de compression plus faible. Le gainage est supposé en béryllium (0.8 mm d'épaisseur) avec un léger développement de la surface d'échange. Un bon aplatissage radial est obtenu grâce au réflecteur d'eau lourde et à la différenciation des taux de combustion entre zone centrale et

zône périphérique ; ceci permet de réaliser une puissance spécifique moyenne de plus de 6 MWe par tonne d'uranium. Le tonnage d'eau lourde immobilisée n'est que d'une demi-tonne par MWe.

Géométrie du coeur

Nombre de crayons d'oxyde d'uranium par grappe	31
Diamètre des pastilles d'oxyde	13 mm
Diamètre intérieur du canal	125 mm
Diamètres intérieur et extérieur du tube de force	135 - 141 mm
Longueur d'une cartouche	60 cm
Poids d'uranium par cartouche	21,2 kg
Nombre de cartouches par canal	8
Longueur intérieure de la cuve	5,60 cm
Pas du réseau (carré)	270 mm
Nombre de canaux	472
Diamètre intérieur de la cuve	770 cm
Poids total d'uranium	80 tonnes
Poids total d'eau lourde dans la cuve	220 tonnes
Poids total d'eau lourde immobilisée	250 tonnes

Puissances

Puissance électrique nette	500 MW
Puissance électrique brute	515 MW
Puissance thermique dégagée dans l'uranium	1430 MW
Puissance thermique dégagée dans le modérateur	90 MW
Puissance thermique transmise à travers l'isolement	30 MW
Puissance de soufflage (turbosoufflantes)	60 MW
Rendement du cycle : $(515 + 60) / (1450 - 30 + 60)$	39.4 %
Rendement net par rapport à la puissance dégagée dans l'uranium 500/1450	35.0 %
Puissance spécifique moyenne (dans l'uranium) :	
1430/80	17.9 MW/T d'U
ou 500/80	6,25 MWe/T

Thermique

Intégrale de conductivité dans le crayon le plus chargé	33 W/cm
Puissance spécifique dans la cartouche la plus chargée	30.4 MW/T d'U
Facteur d'aplatissement axial	0.72
Facteur d'aplatissement radial	0.82
Puissance évacuée par le CO ² dans le canal le plus chargé	3.65 MW
Température d'entrée du CO ²	260° C

Température de sortie du CO ²	510° C
Température maximum nominale de gaine	625° C
Pression à l'entrée du CO ²	75 bars
Débit total de CO ²	4,90 T/s
Caractéristiques de la vapeur : pression	87 bars
Température de surchauffe	490° C

Neutronique

Taux de combustion moyen en uranium naturel (MWj dégagés dans l'uranium)	8700 MWj/T
Taux de combustion moyen avec du 0.93 % en U ₅	15000 MWj/T

b) Evaluations économiques

L'avantage économique essentiel des réacteurs à eau lourde réside dans la très faible contribution du renouvellement du combustible dans le coût du kWh. Par ailleurs les charges financières liées au combustible sont également très faibles. On devrait donc être autorisé, à prix du kWh égal, à accepter pour les centrales à eau lourde des investissements plus élevés que pour d'autres types de réacteurs. En réalité il semble bien que même de ce point de vue les perspectives soient favorables, et qu'on puisse espérer parvenir à des coûts d'investissements du même ordre de grandeur que dans les filières considérées comme éprouvées.

Des estimations ont été faites en France par simple transposition des coûts EL 4 à une grande centrale de 500 MWe de conception entièrement analogue. Si certaines estimations sont peut être insuffisantes faute d'expérience ou d'études détaillées, dans d'autres secteurs au contraire on est déjà sûr de pouvoir améliorer considérablement les solutions techniques et réduire les coûts : on a indiqué plus haut que tel était l'objet des "études de filière". Ces estimations donnent néanmoins une première idée des ordres de grandeurs. On trouve ainsi que les coûts directs, y compris toutes les dépenses d'aménagement du site et de démarrage de la centrale se monteraient à environ 800 F/kW, eau lourde et combustible non compris ; en incluant 35 % pour les coûts indirects (10 % imprévus, 8 % architecte industriel, 17 % intérêts intercalaires), ainsi que le coût d'achat de l'eau lourde supposé au prix américain actuel de 24 \$/lb, les investissements se monteraient au total à environ 1200 F par kW net installé.

A titre indicatif, si on admet un amortissement sur 70000 heures actualisées (soit par exemple pour un taux d'intérêt de 7 % une durée de vie de 20 ans et un fonctionnement annuel de 6000 heures, ou encore 25 ans et 6000 heures), ces chiffres conduiraient à une contribution dans le coût du kWh d'environ 1,70 centimes. Comme la contribution du cycle de combustible devrait être au plus de 0.50 centimes, on voit qu'on arrive en incluant les autres frais de fonctionnement à un total tout à fait intéressant.

En ce qui concerne le cycle de combustible, les résultats dépendent du choix exact des matériaux qui conditionne à la fois les prix et le bilan neutronique, et de la teneur initiale en uranium 235 pour le cas où on s'autoriserait un très léger enrichissement. Une discussion détaillée est donnée dans la référence [6].

Par exemple dans le cas uranium naturel - gainage béryllium, le coût des éléments combustibles en F/kg d'uranium pourrait se décomposer de la manière suivante :

uranate (cotation 8 \$/lb U ³⁰⁸)	104 F/kg
transformation en UO ² , frittage, gainage	170
gaines en Be et pièces accessoires (sur la base 1,5 F/g de Be contenu)	<u>86</u>
	360 F/kg

Pour les conditions indiquées plus haut (8700 MWj/T, rendement net 35 %), le coût de renouvellement est de 0,49 c/kWh. Les charges financières, compte tenu des procédures de démarrage de la centrale sont équivalentes à l'amortissement d'une fraction de la première charge de l'ordre de 50 %, d'où une contribution de 0,04 c/kWh.

Dans le cas où on remplacerait le béryllium par un alliage zirconium cuivre, le taux d'irradiation en uranium naturel serait un peu plus faible, mais le coût du combustible gainé par kg le serait également. La différence entre les deux solutions s'atténue encore si on autorise un très léger enrichissement.

Il y a en effet intérêt dans tous les cas à porter le taux de combustion à sa valeur optimale par un très léger enrichissement qui permet de brûler au maximum le plutonium formé. Par exemple il suffit de porter la teneur en uranium 235 à 0,93 % pour faire passer le taux de combustion de 8700 à 15000 MWj/T. Par rapport à la solution précédente, en admettant le barème américain actuel pour la

fourniture d'uranium enrichi, le poste uranium est porté de 104 à 236 F et le coût de renouvellement n'est plus que de 0.40 c/kWh. Les charges financières sont inchangées, puisque le chargement initial du réacteur continuerait à être en uranium naturel.

Dans l'exemple cité chaque gramme supplémentaire d'uranium 235 fournit 3 Mégawatts-jour supplémentaires, soit presque quatre fois l'énergie libérée par sa propre fission ; ce résultat est obtenu grâce à l'excellente économie de neutrons du réacteur à eau lourde ; il résulte d'un épuisement plus poussé de l'uranium sortant de la pile et d'une utilisation beaucoup plus complète du plutonium formé.

Un tel cycle de combustible permet de tirer parti avec le maximum de souplesse des disponibilités en uranium légèrement enrichi tout en permettant de revenir à tout moment, et sans pénalisation financière sérieuse, à un cycle à uranium naturel.

Conclusion

Bien que les réacteurs modérés à eau lourde et refroidis par gaz carbonique n'aient pas atteint un stade industriel comparable à celui des réacteurs considérés comme éprouvés - eau pressurisée ou bouillante et graphite gaz-, les bases techniques sont suffisamment solides et les perspectives suffisamment attrayantes pour que les efforts actuels soient poursuivis en vue d'un développement important des réacteurs de ce type.

REFERENCES

- [1] J.L. BERNARD, M. FOULQUIER et P. THOME
Structures du coeur du réacteur "eau lourde-gaz" EL 4
Communication à cette conférence
- [2] C. RINGOT, H. BAILLY, R. BUJAS, H. VIDAL
L'élément combustible du 1er jeu de EL 4
Rapport CEA à paraître
- [3] M. WEISZ, J. MALLÉN avec la collaboration de Y. ADDA et
J.M. DUPOUY
L'utilisation du béryllium comme matériau de gaine
Communication à cette conférence
- [4] R. CARLE, P. SCHULHOF, P. SEVIN, J. BUTTIN
Caractéristiques et problèmes de construction d'EL 4
Communication à cette conférence
- [5] R. MARTIN et R. ROCHE
Etudes de structures nouvelles adaptées aux réacteurs
graphite-gaz et eau lourde-gaz
Communication à cette conférence
- [6] R. NAUDET et M. SALESSE
Les cycles de combustible dans les réacteurs de puissance
à eau lourde refroidis par gaz
Symposium de la Société Européenne de l'Energie Atomique
"Fuels cycles" Baden-Baden (Sept. 1963)

FIN