

UN REACTEUR A HAUT FLUX ET FAISCEAUX SORTIS

par

Paul AGERON

Avec la collaboration de

G. DENIELOU, R. DAUTRAY, J. FOURNIER,

B. JACROT, P. PERROUD.

Commissariat à l'Energie Atomique

J. LACAZE

Centre National de la Recherche Scientifique

L. WEIL

Faculté des Sciences de Grenoble

Rapport CEA - R 2682

Genève 1964, A Conf. 28/P/ 49

CEA-R 2682 - DENIELOU G., JACROT B., WEIL L., LACAZE A., AGERON P.,
PERROUD P., DAUTRAY R.,

UN PROJET DE REACTEUR A HAUT FLUX ET FAISCEAUX SORTIS POUR
PHYSICIENS.

Sommaire. -

Les besoins français en canaux pour sortie de neutrons de différentes énergies sont brièvement indiqués. L'intérêt bien connu des neutrons froids (plus de 4 \AA°) est souligné. Les grandes lignes d'un réacteur permettant de satisfaire les physiciens sont esquissées. Ce sont les suivantes :

- 1° - Flux dans l'eau lourde du réflecteur de l'ordre de $7 \cdot 10^{14}$ thermiques.
- 2° - Souplesse d'emploi maximum obtenue par :
 - séparation physique du coeur et du réflecteur
 - indépendance des expériences entre elles
 - possibilité de modification, sans interruption notable du fonctionnement de la pile, des expériences physiques jusqu'à - et y compris - la nature du réflecteur utilisé. ./.

CEA-R 2682 - DENIELOU G., JACROT B., WEIL L., LACAZE A., AGERON P.,
PERROUD P., DAUTRAY R.,

PROJECT FOR A HIGH-FLUX EXTRACTED NEUTRON BEAM REACTOR FOR
PHYSICISTS.

Summary. -

French requirements in neutron beams of different energies extracted from a reactor are briefly described. The well-known importance of cold neutrons (above 4 \AA°) is emphasized. The main characteristics of a reactor suitable for physicists are outlined : They are :

- 1° - A flux of about $7 \cdot 10^{14}$ thermal neutrons in the heavy water of the reflector
- 2° - Maximum flexibility obtained by :
 - physical separation of the core and the reflector
 - independance of the different experiments
 - possibility of modifying physical experiments up to - and including - the nature of the used reflector, without any appreciable interruption in the operation of the reactor. ./.

- réduction au minimum des protections fixes ; emploi largement généralisé des protections liquides (eau) et fluidisées (sables).

3° - Continuité technologique aussi grande que possible avec les réacteurs de recherche français existant ou en construction (SILOE, PEGASE, OSIRIS).

4° - Sécurité de fonctionnement recherché par la simplicité de conception.

5° - Minimisation des frais de construction. La réduction des frais d'exploitation est recherchée plutôt indirectement par la simplicité des solutions et la réduction du personnel d'exploitation, que directement par la minimisation des consommations d'éléments combustibles et d'énergie.

La solution préconisée peut être décrite comme un réacteur de type piscine à coeur clos, non pressurisé, très sous modéré par l'eau légère de refroidissement. ./.

- reduction of fixed shields to a minimum ; ample use of liquid shields (water) and fluid shields (sands).

3° - Technological continuity as far as possible with French research reactors (SILOE, PEGASE, OSIRIS) already existing or under construction.

4° - Safety of operation arising from simplicity of conception.

5° - Minimised construction costs. Lowering of the operating costs is looked for indirectly in the simplification of the solutions and the reduction of operating staff, rather than directly by reducing the consumption of fuel elements and energy.

The recommended solution can be described as a closed-core non-pressurized swimming-pool reactor, highly under-moderated by the cooling light water.

Surrounding the reactor are a number of "beam tubes-loops" each consisting of :

- a part of the reflector (heavy water in the example described) ./.

CEA-R 2682 - Suite 3

Entourant le réacteur, se trouvent un certain nombre de "canaux-boucles" comprenant chacun :

- une portion du réflecteur (eau lourde dans l'exemple décrit)
- une portion de canal d'extraction de neutrons
- les circuits nécessaires à leur réfrigération
- les amenées de fluides convenables au nez de canal (hydrogène liquide dans le cas décrit)
- les départs de mesure et de contrôle nécessaires.

L'ensemble des canaux-boucles baigne dans l'eau de la piscine métallique auto-porteuse.

La protection extérieure à la piscine est assurée, pour sa plus grande partie, par du sable lourd à l'intérieur duquel trouvent place les portions restantes de canaux d'extraction, le matériel d'expérience supportant des doses bien supérieures à celles qui sont biologiquement tolérables.

./.

CEA-R 2682 - Suite 3

- a part of neutron extraction beam tube
- the circuits required for their cooling
- the inlet systems of suitable fluids to the beam tube nose (liquid hydrogen in the example described)
- the necessary outlets for measurement and control system.

The whole "beam tubes loops" is immersed in the water of the metallic self-supporting swimming-pool.

The shielding outside the swimming-pool is composed for the most part by heavy sand in which is the rest of the beam extraction tubes and the experimental equipment which can support doses much higher than the ones which are biologically permissible.

The final part of the communication describes the studies carried out on the realization a liquid hydrogen cold sink, one of the most important experimental devices envisaged.

La dernière partie de la communication décrit les études poursuivies pour la réalisation de la source froide à hydrogène liquide qui est un des principaux dispositifs expérimentaux envisagés.

1964 - Commissariat à l'Energie Atomique - France

20 p.

1964 - Commissariat à l'Energie Atomique - France

20 p.

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.

UN REACTEUR A HAUT FLUX ET FAISCEAUX SORTIS

par

Paul AGERON¹⁾

1. - GENERALITES

1.1 - L'utilisation des faisceaux de neutrons de pile n'a d'abord été que le sous produit des efforts faits en vue de la production d'énergie économique. Connaissance des sections efficaces ou essais technologiques en canal s'inscrivaient dans un programme d'ensemble à but pratique immédiat.

Un pas décisif a été fait aux USA en 1960 quand fut décidée la construction de HFBR (1). Celle-ci est justifiée par les développements considérables des expériences utilisant les neutrons comme moyen original d'investigation de la matière. La comparaison avec photons, électrons et protons est éclairante :

- non chargé le neutron pénètre loin dans la matière.
- il possède un moment magnétique qui en fait une sorte de microsonde magnétique à l'échelle atomique.
- ses énergies peuvent être faibles et comparables aux énergies d'excitation des solides que l'on peut mesurer directement.
- il a des sections efficaces du même ordre de grandeur pour tous les noyaux (permettant par exemple l'observation des atomes d'hydrogène).
- il peut posséder une grande longueur d'onde (supérieure à 4 \AA permettant soit d'éliminer les réflexions de BRAGG soit d'observer des paramètres d'ordre de très grandes dimensions (1000 \AA par exemple).

1) Avec la collaboration de : G. DENIELOU, R. DAUTRAY, J. FOURNIER, B. JACROT et P. PERROUD, Commissariat à l'Energie Atomique. J. LACAZE, Centre National de la Recherche Scientifique. L. WEIL, Faculté des Sciences de Grenoble.

Les figures 1 et 2 illustrent ces propriétés. Il serait trop long de citer toutes les expériences que rendent possible l'existence de sources intenses de neutrons. Certes elles restent nombreuses en physique nucléaire et spécialement en spectroscopie nucléaire étudiée soit par les niveaux de résonance pour neutrons, soit par les gammas de capture. Mais c'est en physique du solide que les perspectives sont les plus brillantes :

- étude des structures magnétiques
- localisation des atomes d'hydrogène dans les structures organiques et - qui sait ? biologiques.
- diffusion inélastique pour étude de la nature des interactions interatomiques ou des couplages entre moments magnétiques.

La seule limitation existant actuellement est la faiblesse des intensités disponibles en neutrons particulièrement en neutrons de grande longueur d'onde qui exigent des dispositifs spéciaux (sources froides).

Or, quel que soit le soin apporté à la réalisation des canaux d'extraction, le nombre de neutrons disponibles à la sortie dépend d'abord du flux régnant à l'extrémité du canal côté réacteur. Un bon ordre de grandeur des besoins des expérimentateurs est 10^{15} n/cm²/s en ce point.

1.2 - On connaît à priori deux solutions techniques pour atteindre ce but dans les conditions économiques convenables :

a - réacteur épithermique du genre préconisé par M. FEINBERG [2] et par ARGONNE [3] [4] .

b - réacteur modéré extérieurement du type HFBR [1] .

C'est une solution de ce type qui avait été examinée lors d'un projet patronné par l'OECD [5] .

Ce projet n'a pas abouti dans l'immédiat. Il a paru intéressant de profiter de ce délai pour examiner si la voie française des réacteurs de recherche fondée, avec SILOE et OSIRIS [6], sur l'exploitation des possibilités maxima des réacteurs piscine, avec coeur à éléments type MTR, ne permettrait pas de parvenir également au résultat recherché. Il paraît en effet possible d'y conserver le réflecteur d'eau lourde dont les avantages pour ce genre d'expérience ont été maintes fois décrits.

Sans doute on peut s'attendre qu'un tel type de réacteur conduise à un rendement :

$$A = \frac{\text{Flux maximum dans le réflecteur}}{\text{Puissance totale dégagée}}$$

un peu moins favorable que les deux précédents.

Or, un accroissement de puissance à flux constant dans le réflecteur a des conséquences :

- sur la protection, mais dans la limite auxquelles nous pensons, elles sont négligeables.
- sur le prix du système de réfrigération, mais, d'un côté, la part du système de réfrigération dans le prix total est faible pour les réacteurs à eau (moins de 6% pour SILOE), de l'autre, un choix judicieux du site permet d'évacuer économiquement de fortes puissances (eau secondaire abondante à basse température); de plus, n'oublions pas que l'adoption de l'eau légère à la place de l'eau lourde comme réfrigérant conduit à des économies considérables : non seulement disparition des investissements d'eau lourde dans le circuit primaire, mais aussi réduction du coût de ce circuit et de ses annexes.
- sur la consommation d'éléments combustibles mais cette consommation ne représente que 20% environ des charges d'exploitation, d'autre part l'adoption d'éléments plus poussés peut, elle aussi, conduire à des frais accrus.

Au fond, plus que la réduction de puissance, c'est celle des coûts globaux de construction et d'exploitation qui doit être recherchée. Examinée sous cet angle, une solution piscine avec réflecteur à eau lourde non pressurisé présente un intérêt certain pour les raisons suivantes :

- réduction des frais d'études et de développement due à la continuité industrielle avec PEGASE [8], SILOE et OSIRIS [6] et à la disparition des problèmes technologiques liés à une haute pression dans le réflecteur.
- réduction correspondante des délais de construction.
- simplicité d'exploitation d'une pile piscine notamment en ce qui concerne la manutention du combustible.
- souplesse d'utilisation en raison de la possibilité de changer ou de modifier au cours de la vie de la pile les dispositifs expérimentaux :
- taille et position des canaux
- nature et dimensions des sources froides et chaudes
- éventuellement, nature du réflecteur.

2 - NEUTRONIQUE DU COEUR

Des calculs neutroniques de diffusion ont été faits en une et deux dimensions (code WANDA en géométrie cylindrique, code PDQ2 en géométrie RZ et XY) à l'aide de constantes à trois groupes d'énergie.

Les milieux multiplicateurs sont des mélanges homogènes uranium enrichi à 93%, aluminium, eau légère.

La section efficace d'absorption thermique de l'eau lourde constituant le réflecteur latéral (hauteur 120 cm, épaisseur 80 cm) a été ajustée pour correspondre à une longueur de diffusion de 110 cm. Certes, les nez de canaux et les structures perturbent le flux dans le réflecteur. Toutefois le flux "non perturbé" reste une grandeur commode quand il s'agit de comparer différents types de réacteurs.

Les volumes de coeur inscrits au Tableau 1 correspondent à un excès de réactivité de 20.000 pcm. La puissance dégagée dans le coeur et la valeur maximum atteinte par le flux thermique dans le réflecteur sont calculées dans chaque cas pour une certaine densité maximum de puissance (1 MW/litre), choisie arbitrairement.

Les cas 1 à 6 se rapportent à des coeurs compacts dont la charge en uranium est uniforme. Le rapport en volume métal/eau est de 1,1.

On constate, qu'à densité maximum de puissance fixée, le meilleur flux est obtenu avec le coeur le moins chargé en uranium, tandis que le coeur le plus chargé a le meilleur rendement. Ces conclusions ne sont pas modifiées par les considérations de forme du coeur; pour une composition donnée, seul le rendement varie sensiblement avec le rapport Diamètre/Hauteur, tandis que le pic de flux est peu affecté.

On remarque figure 3 courbe S_1 et S_2 que la densité de puissance, maximum à l'interface, décroît très vite lorsqu'on se déplace vers l'intérieur du coeur. En réalité, le flux moyen thermique créé en un point du réflecteur par un neutron de fission est étroitement lié à la position dans le coeur du noyau d'uranium dont il est issu. On s'en rendra compte en observant (fig. 4) comment varie, en géométrie cylindrique, le flux moyen que créé, à 12 cm de l'interface coeur-réflecteur, un neutron provenant de la fission d'un noyau situé en r . La courbe de la figure 4 tracée dans le coeur de charge uniforme, fait apparaître l'importance très grande des sources localisées au voisinage de l'interface coeur-réflecteur.

On peut donner un ordre de grandeur de la limite imposée au flux dans le réflecteur par la densité maximum de puissance. Cette limite serait atteinte si la

Sans doute on peut s'attendre qu'un tel type de réacteur conduise à un rendement :

$$A = \frac{\text{Flux maximum dans le réflecteur}}{\text{Puissance totale dégagée}}$$

un peu moins favorable que les deux précédents.

Or, un accroissement de puissance à flux constant dans le réflecteur a des conséquences :

- sur la protection, mais dans la limite auxquelles nous pensons, elles sont négligeables.
- sur le prix du système de réfrigération, mais, d'un côté, la part du système de réfrigération dans le prix total est faible pour les réacteurs à eau (moins de 6% pour SILOE), de l'autre, un choix judicieux du site permet d'évacuer économiquement de fortes puissances (eau secondaire abondante à basse température); de plus, n'oublions pas que l'adoption de l'eau légère à la place de l'eau lourde comme réfrigérant conduit à des économies considérables : non seulement disparition des investissements d'eau lourde dans le circuit primaire, mais aussi réduction du coût de ce circuit et de ses annexes.
- sur la consommation d'éléments combustibles mais cette consommation ne représente que 20% environ des charges d'exploitation, d'autre part l'adoption d'éléments plus poussés peut, elle aussi, conduire à des frais accrus.

Au fond, plus que la réduction de puissance, c'est celle des coûts globaux de construction et d'exploitation qui doit être recherchée. Examinée sous cet angle, une solution piscine avec réflecteur à eau lourde non pressurisé présente un intérêt certain pour les raisons suivantes :

- réduction des frais d'études et de développement due à la continuité industrielle avec PEGASE [8], SILOE et OSIRIS [6] et à la disparition des problèmes technologiques liés à une haute pression dans le réflecteur.
- réduction correspondante des délais de construction.
- simplicité d'exploitation d'une pile piscine notamment en ce qui concerne la manutention du combustible.
- souplesse d'utilisation en raison de la possibilité de changer ou de modifier au cours de la vie de la pile les dispositifs expérimentaux :
- taille et position des canaux
- nature et dimensions des sources froides et chaudes
- éventuellement, nature du réflecteur.

2 - NEUTRONIQUE DU COEUR

Des calculs neutroniques de diffusion ont été faits en une et deux dimensions (code WANDA en géométrie cylindrique, code PDQ2 en géométrie RZ et XY) à l'aide de constantes à trois groupes d'énergie.

Les milieux multiplicateurs sont des mélanges homogènes uranium enrichi à 93%, aluminium, eau légère.

La section efficace d'absorption thermique de l'eau lourde constituant le réflecteur latéral (hauteur 120 cm, épaisseur 80 cm) a été ajustée pour correspondre à une longueur de diffusion de 110 cm. Certes, les nez de canaux et les structures perturbent le flux dans le réflecteur. Toutefois le flux "non perturbé" reste une grandeur commode quand il s'agit de comparer différents types de réacteurs.

Les volumes de coeur inscrits au Tableau 1 correspondent à un excès de réactivité de 20.000 pcm. La puissance dégagée dans le coeur et la valeur maximum atteinte par le flux thermique dans le réflecteur sont calculées dans chaque cas pour une certaine densité maximum de puissance (1 MW/litre), choisie arbitrairement.

Les cas 1 à 6 se rapportent à des coeurs compacts dont la charge en uranium est uniforme. Le rapport en volume métal/eau est de 1,1.

On constate, qu'à densité maximum de puissance fixée, le meilleur flux est obtenu avec le coeur le moins chargé en uranium, tandis que le coeur le plus chargé a le meilleur rendement. Ces conclusions ne sont pas modifiées par les considérations de forme du coeur; pour une composition donnée, seul le rendement varie sensiblement avec le rapport Diamètre/Hauteur, tandis que le pic de flux est peu affecté.

On remarque figure 3 courbe S_1 et S_2 que la densité de puissance, maximum à l'interface, décroît très vite lorsqu'on se déplace vers l'intérieur du coeur. En réalité, le flux moyen thermique créé en un point du réflecteur par un neutron de fission est étroitement lié à la position dans le coeur du noyau d'uranium dont il est issu. On s'en rendra compte en observant (fig. 4) comment varie, en géométrie cylindrique, le flux moyen que créé, à 12 cm de l'interface coeur-réflecteur, un neutron provenant de la fission d'un noyau situé en r . La courbe de la figure 4 tracée dans le coeur de charge uniforme, fait apparaître l'importance très grande des sources localisées au voisinage de l'interface coeur-réflecteur.

On peut donner un ordre de grandeur de la limite imposée au flux dans le réflecteur par la densité maximum de puissance. Cette limite serait atteinte si la

densité de puissance était uniforme; soit $0,955 \times 10^{15}$ n/cm²/s à comparer à 0,488 trouvée dans le cas 5 pour une même densité maximum de puissance de 1 Mw/litre.

La puissance serait d'environ 63 MW, c'est-à-dire qu'un accroissement du flux de 95% n'entraînerait qu'une diminution de 12,5% du rendement A.

Le seul fait de séparer le coeur en deux régions peut contribuer à aplatis sensiblement la répartition des sources. L'intérêt de cette solution apparaît dans le tableau 1 cas 7 et 8. En conservant dans la région centrale les mêmes charges que dans les cas 5 et 6 et en limitant à quelques centimètres l'épaisseur de la région extérieure faiblement chargée, on modifie peu les volumes critiques.

Comparés aux coeurs uniformément chargés qui leur correspondent, les coeurs à deux régions ont cependant un rendement moindre, du fait de l'aplatissement des sources. Mais la valeur maximum du flux thermique est accrue de plus de 55% pour une diminution de 5 à 6% du rendement.

L'étude de l'importance des sources du point de vue du flux qu'elles créent dans le réflecteur suggère de ne rechercher un aplatissement des sources qu'au voisinage seulement de l'interface coeur-réflecteur. Dans ce but, on peut être tenté de retirer le combustible de la zone située près de l'axe du coeur, où la puissance qui est dissipée apparaît mal utilisée, et de lui substituer une cavité d'eau lourde, formant réflecteur central.

En ce qui concerne le pic de flux dans le réflecteur latéral et le rendement, un premier examen montre que les résultats auxquels conduisent des coeurs du type couronne restent comparables à ceux obtenus avec des coeurs compacts.

Toutefois un coeur couronne peut présenter certains avantages, notamment:

- permettre la compensation de réactivité par l'emploi d'un poison homogène contenu dans l'eau lourde de la cavité (comme étudié dans le cas 10).
- se prêter à d'éventuelles irradiations d'échantillons au centre de la cavité.

De ce fait, cette solution ne devrait pas être écartée à priori d'une étude ultérieure.

On cherche à utiliser comme éléments combustibles, des éléments de type MTR classique à plaque parallèles, de mêmes dimensions, dont la technologie et la tenue en pile sont connues et éprouvées. Les plaques sont de deux types seulement pour réaliser deux régions combustibles à charge en uranium différentes

Une disposition de ces éléments combustibles en couronne entre deux viroles autour d'un réflecteur central permet alors de conserver une géométrie cylindrique (figure 5b). Il n'en va pas de même avec un coeur compact pour le quel l'emploi de ces éléments impose une configuration prismatique (figure 5a) et un caisson alvéolé. Il en résulte un relèvement de flux plus important aux angles du réacteur, soit 1,72 dans l'angle à mi-hauteur, pour 1,48 au centre de la face (cas. 12). Par ailleurs, l'emploi de barres de contrôle à suiveur combustible, se déplaçant à l'intérieur du coeur, entraîne une distorsion du flux de neutrons thermiques dans le réflecteur au cours du cycle. Le cas d'un coeur dans lequel les barres se trouveraient enfoncées en rideau jusqu'à mi-hauteur du coeur, qui semble le cas le plus défavorable, a été étudié à ce point de vue, et comparé, à puissance égale, à celui d'un même coeur en fin de cycle (barres hautes). Il apparaît que le flux dans le réflecteur ne subit de variation supérieure à 5% en aucun point du volume intéressé par les nez de canaux.

3 - REFROIDISSEMENT DU COEUR

Dans le cas type choisi (cas 12), un flux maximum de 10^{15} dans le réflecteur exige une densité de puissance maximum de 1 460 wats/cm³ et une puissance totale de 70 Mw.

Un bilan approximatif montre que 90% de cette puissance apparaît sous forme de chaleur dans les plaques combustibles 2,5% environ dans l'eau du coeur et le reste 7,5% dans le réflecteur eau lourde, soit au maximum, par cm² de plaque chauffante, 320 watts à transférer et 330 watts à évacuer, tout le long du canal chaud, la répartition de la puissance y étant pratiquement uniforme.

Le refroidissement se fait par convection forcée dans le sens ascendant selon le procédé en cours de mise au point pour le réacteur OSIRIS [6] [7].

On cherche à calculer au plus juste la vitesse nominale de circulation de l'eau dans le coeur, en raison des inconvénients économiques (dimensions des circuits de refroidissement, puissance de pompage) et technologiques (pression à l'amont des éléments combustibles, risque de vibration des assemblages et de déformation des plaques), que présentent les vitesses trop élevées.

Conformément au raisonnement développé au sujet des piles SILOE et OSIRIS [6], la limite inférieure de vitesse de l'eau est celle qui permet d'éviter tout

début de risque, même minime, de détérioration du coeur par "burn out" de plaques combustibles, précédé ou non d'asséchement du canal chaud et ceci même lorsqu'on s'écarte des conditions normales de fonctionnement du réacteur, c'est-à-dire :

- dépassement de la puissance nominale jusqu'à intervention des sécurités à dépassement de puissance, à 1,1 fois la puissance nominale.
- diminution du débit de refroidissement (cas d'arrêt des pompes) jusqu'à intervention des sécurités à manque de débit, à 0,9 fois le débit nominal; cette valeur, pour des pompes munies de volants est atteinte en 2 à 3 secondes, temps suffisamment long par rapport au temps normal de réponse des sécurités.

Dans ces conditions, et en tenant compte des incertitudes figurant au tableau 2, les vitesses nominales nécessaires, pour éviter le burn out [9] (à 1,1 fois la puissance nominale et 0,9 fois le débit nominal), est de l'ordre de 1200 cm/s, et pour éviter l'asséchement du canal chaud [10] (à 1,1 fois la puissance nominale et 0,9 fois le débit nominal), 1000 cm/s.

Une détermination expérimentale hors pile, dans les conditions réelles du canal chaud est nécessaire pour fixer avec plus de précision la valeur nominale de la vitesse à adopter.

Notons qu'à une vitesse de l'ordre de 12m/s et sans pressurisation, la température nominale de plaque au point chaud est alors de 100°C, valeur très inférieure à la température du début d'ébullition locale en ce point (environ 145°C).

4 - TECHNOLOGIE GENERALE

4.1. Les ensembles réflecteurs - canaux - boucles

Le réflecteur extérieur est non seulement séparé du coeur, mais divisé en plusieurs secteurs indépendants, de dimensions extérieures identiques (figures 6 et 7), comprenant chacun :

- une cuve à eau lourde, pouvant s'imbriquer contre le coeur et entre les cuves identiques des autres secteurs, avec un jeu suffisant (2 à 3 mm) pour permettre le refroidissement des parois par circulation forcée d'eau légère extérieure à la cuve.
- un circuit de refroidissement de l'eau lourde et des branchements vers les circuits annexes (épuration, stockage).
- les "nez" de canaux intérieurs à la cuve et soudés à celle-ci.
- éventuellement un logement pour une boucle à modérateur froid ou chaud.

Cet ensemble monté sur une charpente rigide est immergé dans la piscine du réacteur au-dessus des bouches d'aspiration de l'eau de refroidissement. Les "nez de canaux" sont raccordés aux sorties de canaux dans l'enceinte de la piscine, soit par des manchettes avec brides d'étanchéité démontables sous eau, soit par une section de canal muni de fenêtres, analogue à celles utilisées dans SILOE [11].

Les boucles verticales sortent par la surface libre de la piscine. Le positionnement et la manutention de ces ensembles s'effectuent de la même manière que pour les "boucles autonomes" de PEGASE [8].

4.2 - Protection

La protection doit être suffisamment importante pour diminuer le bruit de fond dans la zone expérimentale autour du réacteur. Par ailleurs il paraît très souhaitable, pour plus de souplesse et d'efficacité dans l'utilisation du réacteur, de pouvoir accéder de façon non permanente, aux parties des dispositifs expérimentaux situés à l'intérieur de la protection. On peut concilier ces deux impératifs en divisant la protection en quatre zones concentriques qui sont à partir du coeur : (figure 8).

- zone 1 : constituée par le réflecteur et la piscine, au-delà de laquelle l'échauffement et l'activation des matériaux est négligeable.
- zone 2 : constituée par une protection fixe, au-delà de laquelle l'accès temporaire est possible, pile arrêtée, mais avec des éléments irradiés dans le coeur.
- zone 3 : constituée par une protection amovible au-delà de laquelle l'accès temporaire est possible pile en marche.
- zone 4 : également constituée par une protection amovible à partir de laquelle commence la zone expérimentable.

Les protections amovibles des zones 3 et 4 peuvent être commodément réalisées au moyen de compartiments en tôle d'acier, remplis d'un mélange fluidisé eau-baryte-ilménite de densité 3,5 environ. Des essais ont montré l'homogénéité de ce type de protection et sa rapidité (de l'ordre de quelques heures) de mise en place et d'évacuation.

5 - SOURCE DE NEUTRONS FROIDS

5.1 Principe

La source de neutrons froids est réalisée en plaçant une cellule à hydrogène liquide dans le réflecteur extérieur du réacteur. Les problèmes qui se posent sont liés au dégagement de chaleur dans le récipient et dans l'hydrogène lui-même.

Ce dégagement de chaleur outre la consommation d'hydrogène qu'il entraîne, conduit à une ébullition qu'il convient de contre-carrer pour que la densité de modérateur reste assez élevée dans la cellule.

a - réduction de l'échauffement : une réduction de l'échauffement est réalisée en diminuant l'épaisseur de la cellule. Des travaux antérieurs ont montré la possibilité d'abaisser à 0,4mm cette épaisseur de la cellule. On peut, en outre, réduire la source de gammas de capture en réduisant l'épaisseur de l'enceinte extérieure séparant le vide d'isolement thermique de l'eau lourde. Nous pensons que cette épaisseur peut être réduite à 4mm d'aluminium sans nuire aux conditions de sécurité. Le réflecteur où se trouve la source est en effet situé dans une piscine, hors de l'enceinte du coeur, et à une pression absolue inférieure à 2 kg/cm².

b - pour réaliser une homogénéité aussi grande que possible de l'hydrogène liquide il faut éliminer les bulles de vapeur au fur et à mesure de leur formation. Ce résultat est obtenu par un effet de centrifugation gazeuse. Le liquide est ainsi projeté sur la paroi cylindrique où il constitue une nappe d'épaisseur variable.

c - le dispositif de centrifugation permet également de réaliser une convection forcée à la paroi et d'évacuer dans de bonnes conditions la chaleur qui y est produite; on se protège ainsi des phénomènes de "burn out" qui risqueraient d'apparaître à défaut de cette précaution. Les études entreprises ont essentiellement pour objet de réaliser une configuration du tourbillon à l'intérieur du vase en communiquant aux liquides une vitesse de rotation suffisante pour que le dégagement de chaleur (qui sera simulée par l'échauffement extérieur puis par des fils chauffants tendus à l'intérieur) perturbe au minimum le ralentissement des neutrons. Les mesures seront faites essentiellement par le ralentissement des neutrons proprement dits mais d'autres expériences de contrôle mentionnées ci-dessous sont également en cours.

5.2 - Servitudes thermiques

L'échauffement dans la partie en pile a été calculé pour une puissance du réacteur de 75 Mw et un flux de neutrons thermiques maximal de 10^{15} n/cm²/s dans le réflecteur en supposant un flux et des spectres non perturbés par la boucle.

Les valeurs des différentes contributions à l'échauffement sont portées sur la figure 8 en fonction de la distance au coeur.

La puissance totale dissipée ou transmise à l'hydrogène est d'environ 2,5 Kw à 20 cm entre l'axe de la boucle et la face du coeur, 1,3 Kw à 30 cm et

0,75 Kw à 40 cm. Pour une puissance de 2,5 Kw il se vaporise 280 l/h d'hydrogène liquide.

5.3 - Formation du tourbillon.

La figure 9 représente le récipient cylindrique d'aluminium (diamètre 150 mm hauteur 150 mm), l'hydrogène liquide forme, sous l'effet de la centrifugation, une couche d'épaisseur relativement uniforme. On donne le mouvement giratoire au liquide en l'introduisant sur la paroi au moyen de 4 tubes de diamètre identique disposés à 90° l'un de l'autre, ce qui permet d'obtenir une bonne symétrie de la surface libre autour de l'axe du récipient.

Cette disposition résulte d'études préliminaires, effectuées avec de l'eau, qui ont permis de déterminer les conditions de formation d'un écoulement giratoire. La forme de la surface libre et son épaisseur dépendent essentiellement du débit et de la vitesse du liquide à la sortie des injecteurs, de la disposition de ceux-ci et de la géométrie du récipient. Lorsque la vitesse tangentielle du liquide est assez grande la configuration de l'écoulement est indépendante de la position du récipient par rapport à la verticale.

5.4 - Mesure de l'épaisseur de la couche d'hydrogène liquide

Pour simuler le flux de chaleur provenant du rayonnement de la pile on place le récipient contenant l'hydrogène liquide à l'air libre sans calorifugeage ; l'air se liquéfie au contact de la paroi extérieure et ruisselle en film très mince. Le débit d'hydrogène liquide introduit correspond au flux de chaleur transmis au travers de la paroi du récipient, soit 2,5 Kw (chiffre recherché).

La mesure de l'épaisseur de la couche d'hydrogène liquide, circulant sur la paroi intérieure, s'effectue par trois procédés : ralentissement de neutrons de 5 MeV, atténuation de gammas de 85 KeV, et radiographie par rayons X de grandes longueurs d'onde.

Ces trois procédés nous renseignent sur la formation de la couche tourbillonnaire d'hydrogène liquide, sur la partie cylindrique du récipient ; son épaisseur moyenne est d'environ 10 mm (ce qui est voisin de l'optimum). L'état de l'hydrogène sur le fond bombé est indiqué par une thermistance.

5.5 - Etudes sur la disposition en pile

La figure montre la disposition adoptée. Le récipient où se forme le tourbillon d'hydrogène liquide est introduit à proximité du coeur de la pile au moyen d'un puits étanche dans lequel on réalise un vide moléculaire.

Les neutrons froids sont canalisés dans deux conduites, jusqu'aux appareils de mesures extérieurs.

En cas d'accidents sur l'alimentation en hydrogène liquide, dont le débit est relativement élevé il sera possible de relever mécaniquement le récipient d'hydrogène liquide et son circuit d'alimentation grâce aux conduites "souples" (hydrogène liquide et gazeux) placés au-dessus de la surface libre de la piscine. On évitera ainsi la fusion de la partie exposée aux rayonnements de la pile.

5.6 - Circuit d'hydrogène liquide

La condition principale imposée au dispositif de refroidissement est d'assurer la continuité de marche par cycles de 15 jours. Il faut qu'en cas d'arrêt accidentel de l'un quelconque des éléments la circulation du liquide soit maintenue. Ceci implique l'emploi d'un stockage d'hydrogène liquide se substituant à cet élément.

L'alimentation peut être réalisée soit avec du liquide sous refroidi, soit avec du liquide bouillant. Nos expériences en écoulement à double phase de l'hydrogène liquide ont montré que pour les faibles titres de vapeur et les courtes distances (inférieures à 100m) que l'on considère ici, il n'est pas nécessaire de faire appel à des dispositifs spéciaux (par exemple purge de vapeur) pour maintenir une bonne stabilité de l'écoulement.

L'hydrogène vaporisé sert de protection thermique pour l'hydrogène liquide entrant.

Le circuit est étudié pour maintenir à pleine puissance une couche d'hydrogène liquide de l'ordre de 1 cm d'épaisseur. Si la puissance spécifique dégagée devient plus grande la couche d'hydrogène s'amincira et rétablira la même puissance totale, à condition toutefois que la puissance dégagée dans l'aluminium ne devienne pas égale à la puissance frigorifique. Le système est donc autorégulateur. Si cependant la chaleur dégagée devenait très faible, la couche d'hydrogène liquide deviendrait trop épaisse et du liquide remonterait dans le tube. On place pour cela un bulbe de thermomètre à tension de vapeur diminuant la puissance frigorifique lorsque l'épaisseur maximale d'hydrogène liquide est atteinte.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HENDRIE J. M et KOUTS H. J. C
"Preliminary Hazards Summary Report on the Brookhaven High Flux Beam Research Reactor" TID 14.771 (1961)
- [2] FEINBERG S. M et autres
"An intermediate reactor for obtaining high intensity neutron fluxes".
P. 2142 GENEVE 1958 Vol. 10
- [3] FROMM L. W
" General design of the Argonne advanced research reactor"
TID 7642
- [4] KELBER C. N.
"Physics advantages of stainless steel cores"
TID 7642
- [5] CROCKER V. S et autres
"High flux beam reactor report"
AERE M 1123 (1962)
- [6] DENIELOU G - LEROUGE B.
"SILOE et OSIRIS"
Communication présentée à la présente conférence
- [7] LEROUGE B. - BERNOT J.
" OSIRIS "
Atompraxis, 1963 n° 11-12
- [8] DAUTRAY R. et autres
" PEGASE "
Communication présentée à la présente conférence
- [9] S. MIRSHAK
"Heat flux ar burn-out"
DP 355 (1959)
- [10] S. FABREGA
"Calcul des pertes de pression le long du canal chaud de SILOE avec ébullition"
TT - 159 (1963)
- [11] AGERON P. et autres
"Rapport de Sûreté de SILOE - Partie descriptive -"
Rapport CEA n°. 2307 (1963).

Incertitudes sur les paramètres thermiques

Mesure de la puissance et répartition	+ 8%
Mesure débit et répartition	- 10%
Teneur globale d'une plaque en U_{235}	+ 2%
Teneur locale en U_{235}	+ 20%
Epaisseur canal	- 15%
Dispersion de la corrélation de COLBURN	- 5%
Dispersion de la corrélation de MIRSHAK	- 16%

LEGENDE DES FIGURES

- Figure 1 - Situation des neutrons dans l'échelle des longueurs d'onde.
- Figure 2 - Situation des neutrons dans l'échelle des énergies.
- Figure 3 - Répartition des sources S de neutrons de fissions et des flux ϕ de neutrons thermiques au voisinage de l'interface coeur-réflecteur, normalisée à une même source à l'interface, pour différentes charges en uranium : 1, cas 6, 2, cas 5, 3, cas 7; 4, cas 9.
- Figure 4 - Flux thermique créé dans le réflecteur à 12 cm de l'interface, par un neutron de fission, en fonction de la position radiale de sa source dans le coeur.
- Figure 5 - Configurations du coeur
a : compact - b : annulaire
1, zone à forte charge en uranium ; 2, zone à faible charge en uranium;
3, réflecteur extérieur ; 3' , réflecteur intérieur.
- Figure 6 - Schéma du réflecteur ; coupe horizontale. 1: coeur; 2: cuve à D_2O ;
3 : canaux indépendants; 4 : canaux partant d'une même source.
- Figure 7 - Schéma du réacteur ; coupe verticale.
1 - piscine principale
2 - canal d'évacuation des boucles et éléments irradiés.
3 - coeur
4 - réflecteur extérieur eau lourde
5 - refoulement coeur

- 6 - aspiration du coeur
- 7 - aspiration piscine
- 8 - refoulement piscine
- 9 - verrouillage élément combustible
- 10 - barre de contrôle
- 11 - commande de barre
- 12 - nez de canal
- 13 - manchette de raccordement des canaux
- 14 - canal
- 15 - boucle à modérateur "froid" ou "chaud"
- 16 - protection fixe
- 17 - protection fluide amovible
- 18 - zone expérimentale

Figure 8 - Echauffement de l'hydrogène liquide et de l'aluminium en fonction de la distance au coeur. Puissance : 75 Mw Flux thermique maximum : $10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$.

Echauffement de l'hydrogène : 1, total; 3, dû aux gammas du coeur ; 5, dû aux captures radiatives ; 7, dû au ralentissement de neutrons. Echauffement de l'aluminium : 2, total ; 4, dû aux gammas du coeur ; 6, dû aux captures radiatives ; 8, dû aux bêtas d'activation.

Figure 9 - Source de neutrons froids.

I, ensemble de la boucle ; II, détail de la source ; 1, amenée de l'hydrogène liquide ; 2, injecteur tangentiel à quatre branches ; 3, récipient ; 4, couche tourbillonnante d'hydrogène liquide ; 5, faisceau de neutrons froids ; 6, coeur du réacteur ; 7, vide.

TABLEAU 1 - CARACTERISTIQUES NEUTRONIQUES DE DIFFERENTS COEURS

Cas	Code	Type de coeur	Géométrie	Section droite	Charge U_{235} (g/l)	Hauteur coeur (cm)	Volume coeur (dm ³)	Densité de puissance max. 1 Mw/1		$A = \frac{\phi_{max}(réf)}{puissance}$ (10 ¹⁰ n/cm ² /kw)
								$\phi_{max}(réf)$ 10 ¹⁵ n/cm ² /s	puissance (Mw)	
1	WANDA	compact	cylindrique	rayon 15 cm	98	46,4	33	0,457	16,4	2,78
2	"	"	"	"	160	36,7	26	0,346	11,2	3,09
3	"	"	"	rayon 20 cm	98	35,4	44,5	0,476	20,8	2,29
4	"	"	"	"	160	30,5	38	0,362	15,2	2,38
5	"	"	"	rayon 25 cm	98	32	62,7	0,488	28,2	1,73
6	"	"	"	"	160	27,1	53	0,372	20,6	1,80
7	"	compact 2 régions	"	rayon int. 22 ext. 25	région int. 98 ext. 53	36,2	71	0,770	47	1,64
8	"	"	"	"	région int. 160 ext. 78	32	62,5	0,583	35,7	1,68
9	"	couronne	"	rayon int. 20 ext. 26	98	51	44	0,482	28,6	1,685
10(3)	"	couronne 2 régions	"	"	région int. 120 ext. 95	51	44	0,560	26,4	2,12
11(4)	"	couronne 2 régions	"	"	région int. 100 ext. 65	51	44	0,680	34,1	1,99
12	PDQ 02	compact 2 régions	prisme à base carrée	côté int. 35 ext. 45	région int. 98 ext. 53	40	81	0,687	47,5	1,45
13 (1)	PDQ 02	"	cylindrique	rayon int. 19,5 ext. 26,5	"	40	88,5	0,687	52,3	1,31
14 (2)	PDQ 02	"	"	"	région int. 77 ext. 34	40	88,5	0,745	56,5	1,315

(1) barre absorbante noire de rayon 8 cm, plongée dans l'axe du coeur jusqu'à mi-hauteur (Keff = 1, 1)

(2) Chargement supposé en fin de cycle (Keff = 1,01)

(3) Compensation de réactivité par poison homogène dans la cavité (Keff = 1)

(4) Chargement supposé en fin de cycle (Keff = 1,07)

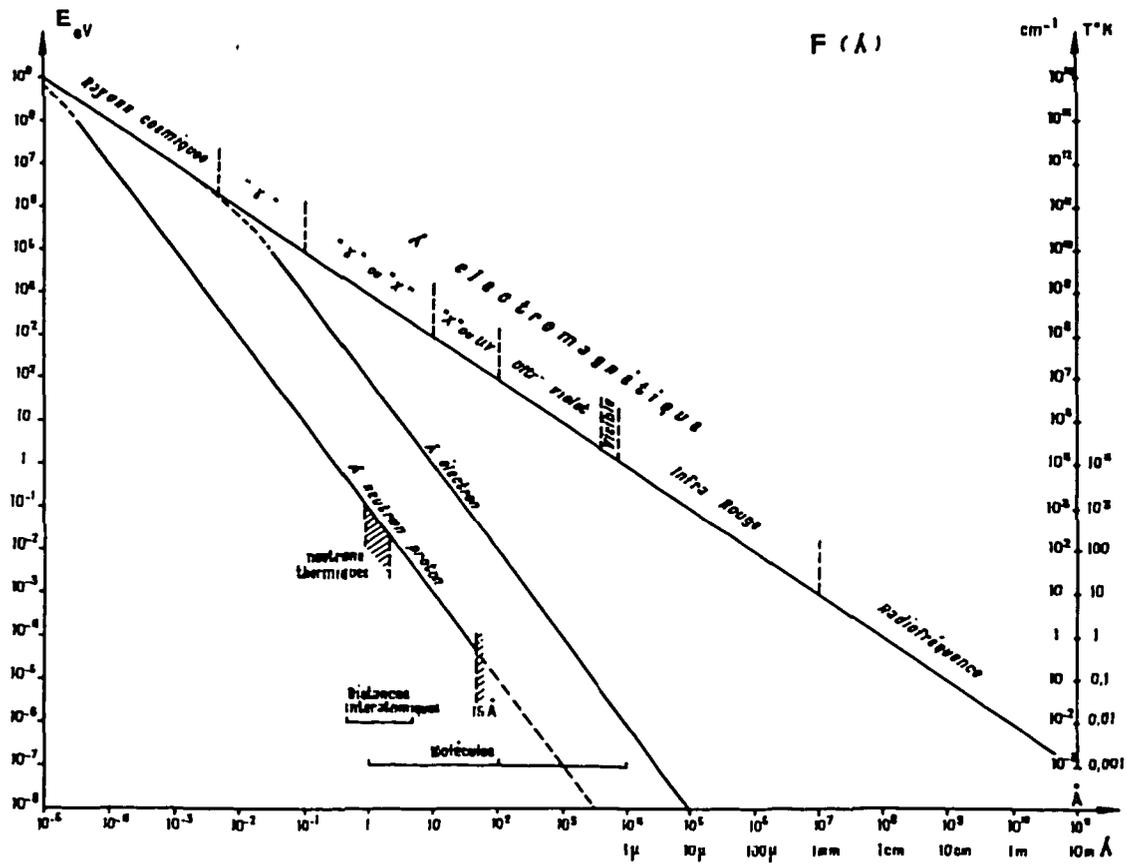


Figure 1

Situation des neutrons dans l'échelle des longueurs d'ondes.

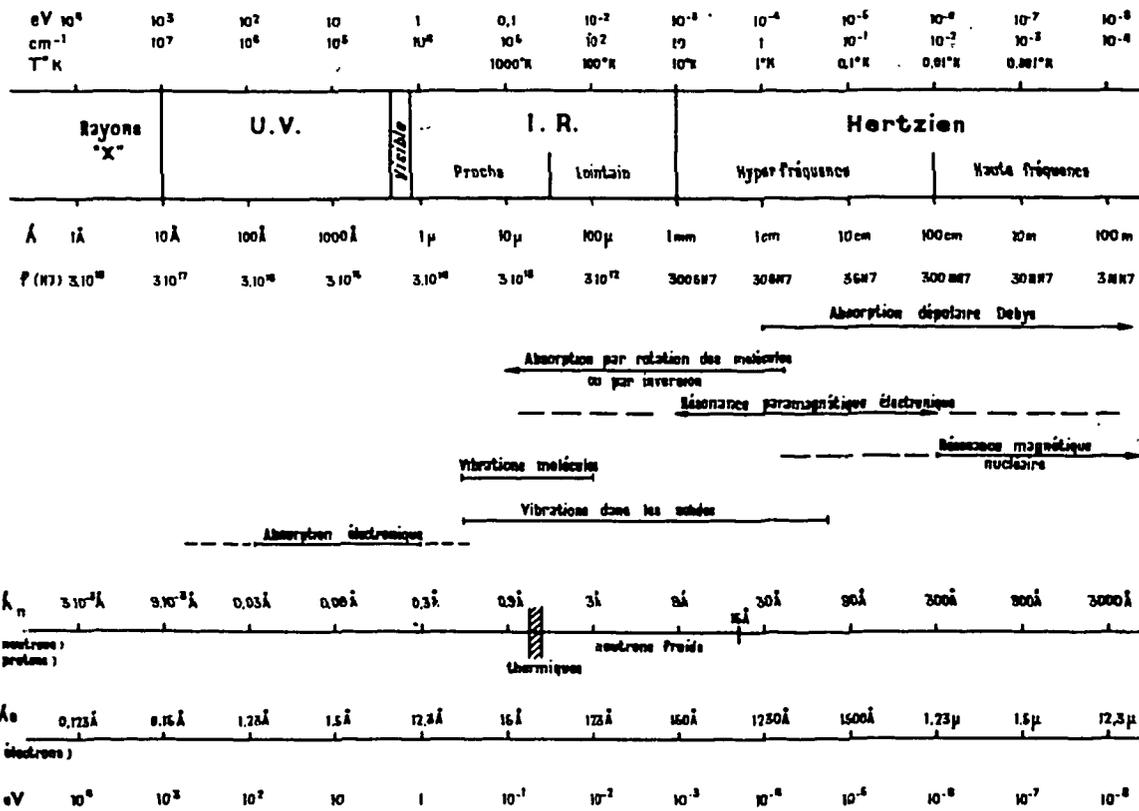


Figure 2

Situation des neutrons dans l'échelle des énergies.

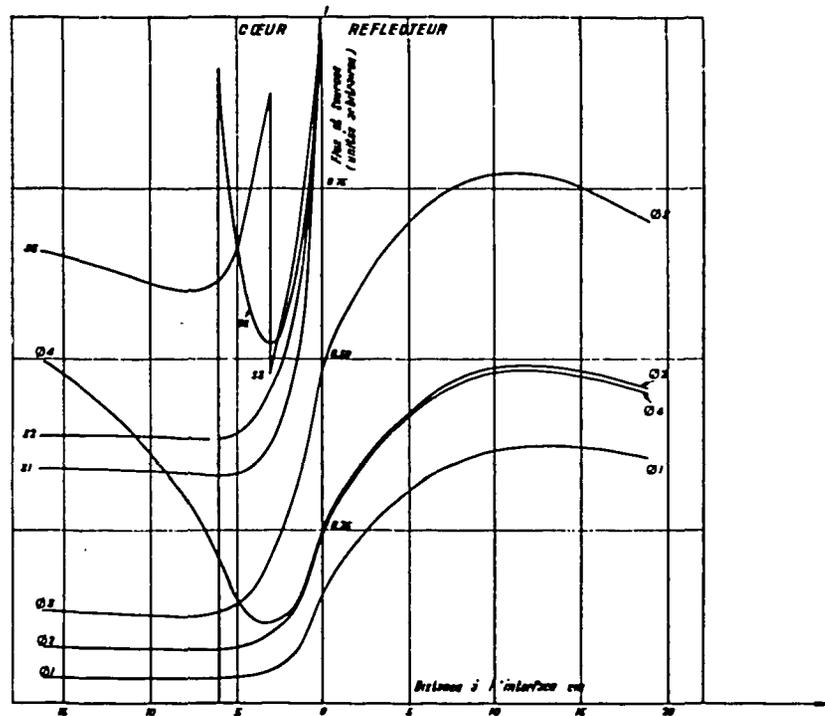


Figure 3

Répartition des sources et des flux.

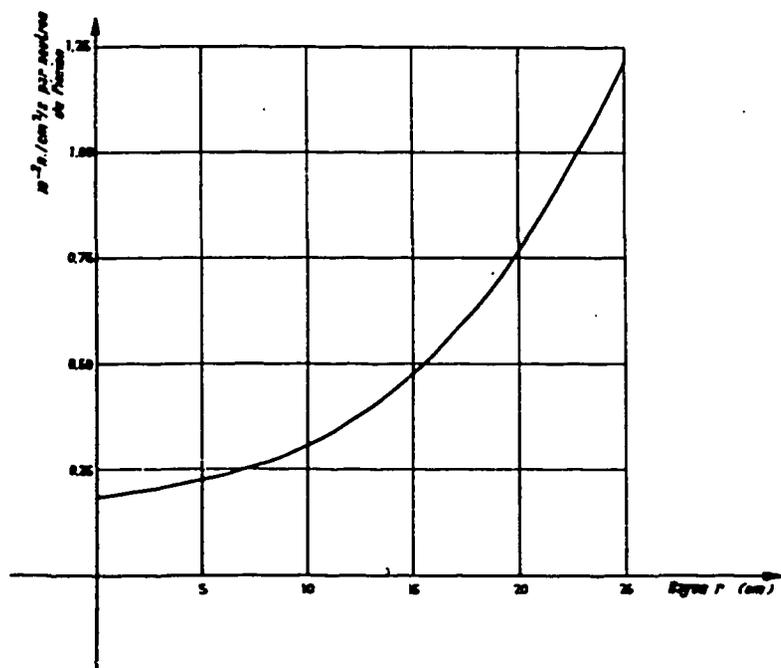


Figure 4

ϕ dans réflecteur selon position de la source.

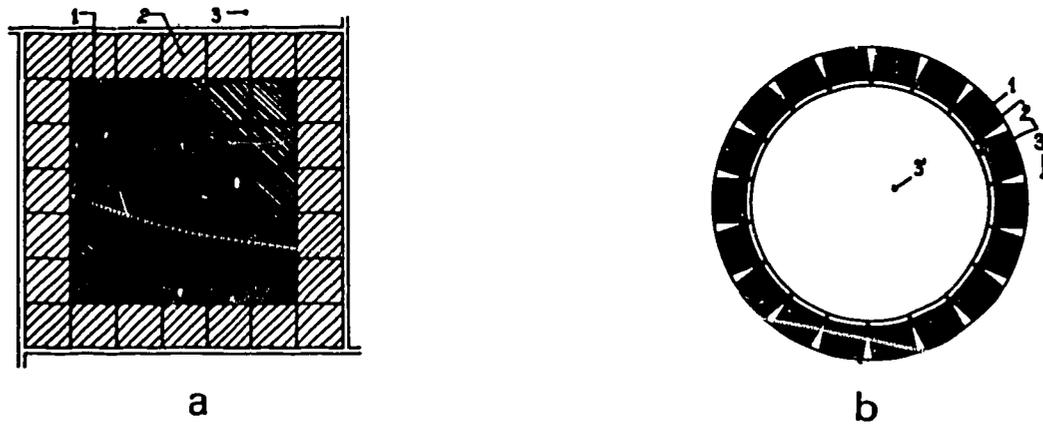


Figure 5

Configuration du coeur.

a) compact

b) annulaire

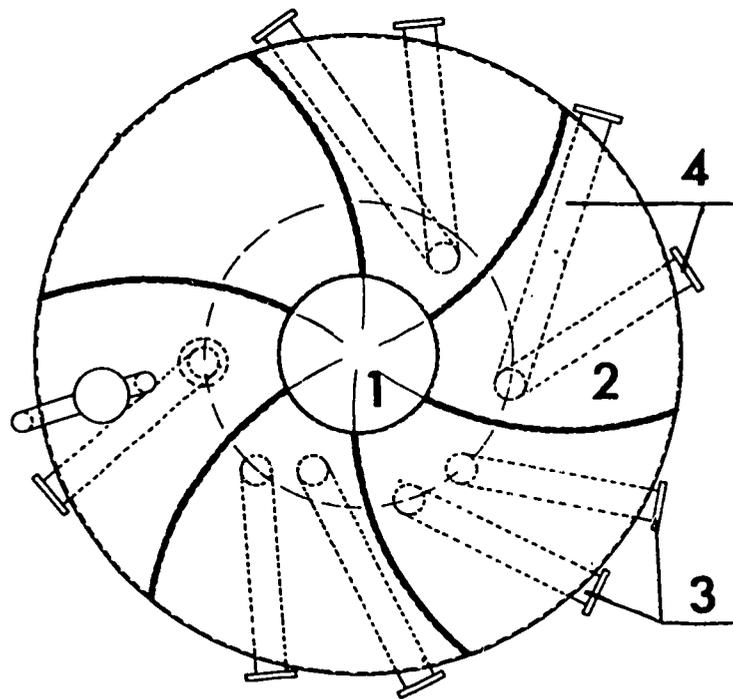


Figure 6

Schéma du réflecteur.

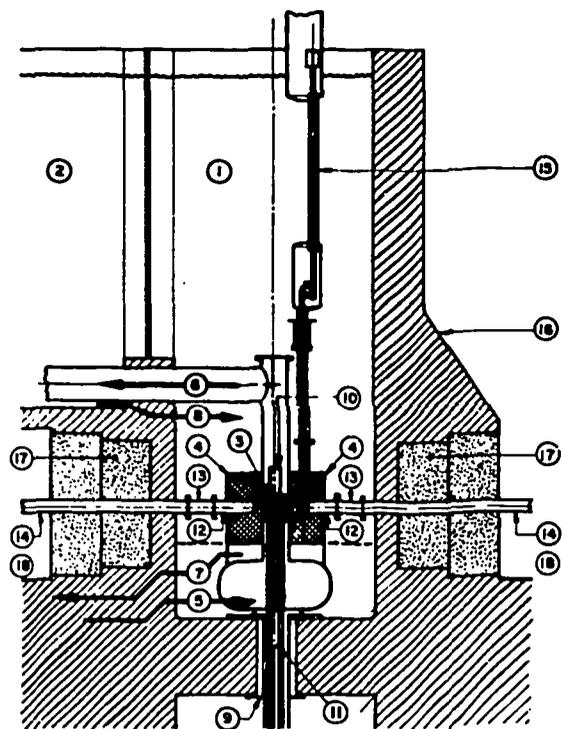


Figure 7

Schéma du réacteur.

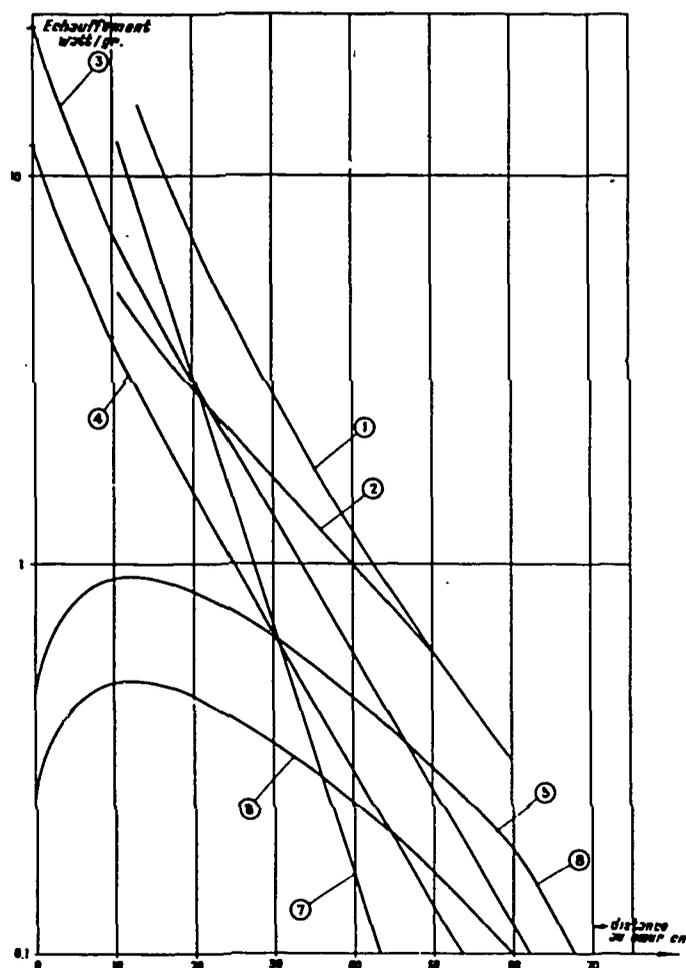


Figure 8

Echauffement Hydrogène liquide et aluminium.

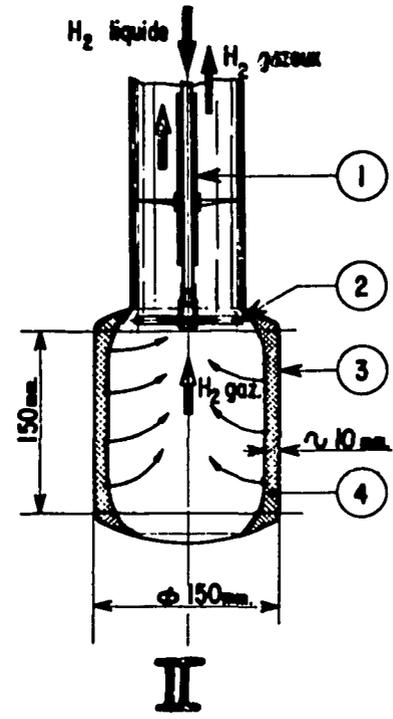
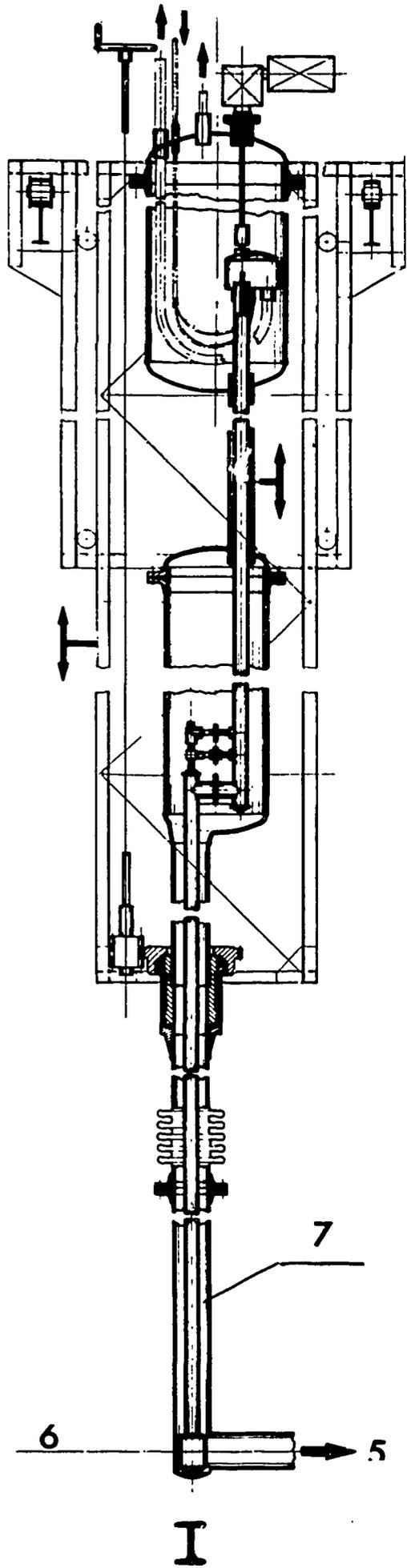


Figure 9

Source de neutrons froids.

FIN