

La source de neutrons froids du réacteur à haut flux

Par P. AGERON *, J.M. ASTRUC *
H. GEIPEL *** et J.VERDIER **

Résumé :

Après avoir analysé les raisons du choix d'une source à deutérium liquide pour obtenir des neutrons de très basse énergie, on décrit la réalisation des principaux éléments de la source froide : circuit de deutérium contenant 8 kg de D₂, dont 4 kg sont liquéfiés, réfrigérateur à hélium d'une puissance de 10 kW entre 18,6 et 24,5 K, armoires de contrôle et de commande de l'installation. Puis on examine le fonctionnement de la source froide dont le principe a été voulu le plus simple possible pour obtenir une grande fiabilité dans l'exploitation.

Summary :

The reason for choosing a liquid deuterium source to obtain very low-energy neutrons are followed by a description of the main elements of the cold source : deuterium circuit containing 8 kg D₂, 4 kg of which are liquefied, helium refrigerator of power 10 kW between 18.6 and 24.5 K, control panels. The working principle of the cold source, deliberately simplified as much as possible for the sake of maximum reliability, is then examined.

Zusammenfassung :

Nachdem die Gründe analysiert werden, die zur Wahl einer Quelle mit flüssigem Deutérium zur Erzeugung von Neutronen sehr geringer Energie geführt haben, wird die Ausführung der wichtigsten Elemente der kalten Quelle beschrieben : der Deuteriumkreislauf mit 8 kg D₂, wovon 4 kg verflüssigt werden, der Kalteanlage mit einer Leistung von 10 kW zwischen 18,6 und 24,5 K, sowie der Kontroll- und Steuerschränke der Anlage. Schliesslich wird der Betrieb der kalten Quelle erläutert, wobei das Prinzip so einfach wie möglich sein sollte, um eine grosse Zuverlässigkeit zu erhalten.

I - CONCEPTION GENERALE

La source de neutrons froids, dont le but est de multiplier les flux de neutrons aux énergies inférieures à 5 meV par un facteur de 10 à 50 (voir la figure 3 de l'article précédent), consiste en une sphère de diamètre 38 cm, remplie de 25 litres de deutérium liquide et placée dans le réflecteur du réacteur à 70 cm de l'axe du coeur [1]. Le choix du deutérium, les dimensions et l'emplacement ont été motivés par :

- Une efficacité de thermalisation meilleure que celle de l'hydrogène ([2] et figure 1).
- Des densités d'échauffement nucléaire comparables à celles des sources froides et des dispositifs d'irradiation existants (Tableau), avec une puissance totale de 6 kW environ [3].
- Un flux maximum de neutrons rapides intégrés sur la durée d'un cycle de 10^{19} n/cm², correspondant à l'expérience acquise en matière de comportement des matériaux irradiés à basse température [4].
- Une influence en réactivité de 360 pcm, avec un effet négatif de 130 pcm en cas de vaporisation du deu-

* Institut Max von Laue - Paul Langevin

** Centre d'études nucléaires de Grenoble, Service des Basses Températures.

*** Gesellschaft für Kernforschung - Karlsruhe RFA.

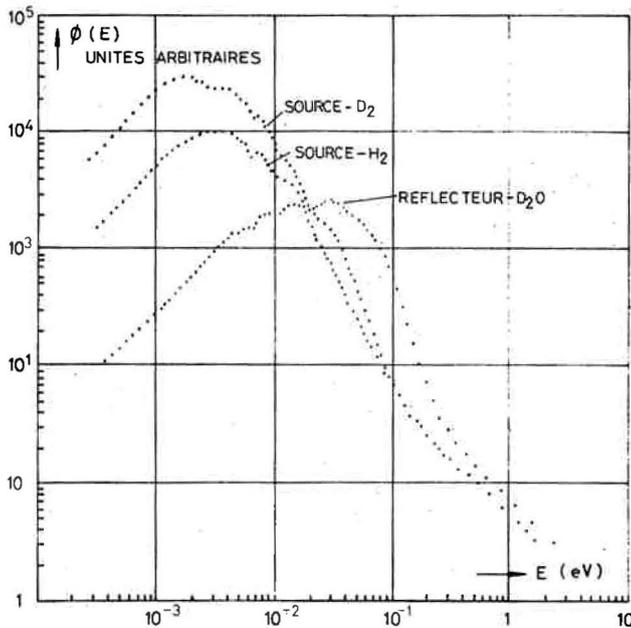


Fig. 1. — Spectres mesurés avec et sans source froide

térium, et un effet positif inférieur à 210 pcm en cas de noyage de la source par l'eau lourde.

- Une taille suffisante pour permettre "d'éclairer" 5 conduits de neutrons de $20 \times 3 \text{ cm}^2$ et un canal de 10 cm de diamètre.

Le deutérium doit être maintenu à l'état liquide pendant les 36 jours d'un cycle de fonctionnement du réacteur. Des précautions doivent être prises pour qu'en aucun moment et en aucun point, le deutérium ne risque de réagir avec l'air environnant. L'installation est en outre conçue de façon à confiner à l'intérieur des circuits les effets d'accidents éventuels (rupture de vase cryogénique, réaction du deutérium avec des impuretés ...) [7].

Compte tenu de ces impératifs, la conception de la source froide est la suivante :

Le deutérium liquide, placé dans un cryostat à l'intérieur du réacteur, est en ébullition sous l'effet du chauffage nucléaire. Les vapeurs de deutérium montent dans une conduite jusqu'à un condenseur refroidi par un réfrigérateur à hélium. Le deutérium recondensé retourne au cryostat par un tube situé à l'intérieur de la conduite de vapeurs. La circulation se fait par thermosiphon naturel sans l'aide d'aucune pompe [5] [6]. La partie froide est reliée en permanence à un réservoir tampon qui constitue la partie chaude de la boucle. La partie froide, entourée d'une enceinte à vide, est entièrement immergée, soit dans l'eau lourde, soit dans la piscine. La partie chaude, en dehors de la piscine, est entourée d'une garde d'azote.

II — REALISATION DES PRINCIPAUX ELEMENTS

L'ensemble de la source froide comporte les éléments suivants :

- le circuit de deutérium, y compris la partie en pile ;
- le réfrigérateur ;
- le tableau de contrôle et de commande.

A) Le circuit de deutérium (Figure 2)

Ce circuit, dont le principe est indiqué ci-dessus, comporte trois parties reliées entre elles par des canalisations.

TABLEAU

Echauffement moyen de la source froide

Echauffement de	par	W/g							W/cm ³	W/cm ²	W	W	
		γ cœur	n rapides	Captures			β dans Al	autres					TOTAL
				dans D ₂	dans Al	dans Zr							
D ₂		0,23	0,03	0,016	0,13	0,109	0,13	0,05	0,705	0,113		3140	5800 *
Al		0,23		0,013	0,30	0,195	0,65	0,06	1,468	3,96	0,6	2660	
Zr		0,23		0,011	0,18	0,345	0,016		0,762	4,9	3,4		**

* Quantité de chaleur à évacuer par ébullition du deutérium, non comprises les pertes thermiques (1200 Watts).

** Quantité de chaleur évacuée dans l'eau lourde du réflecteur.

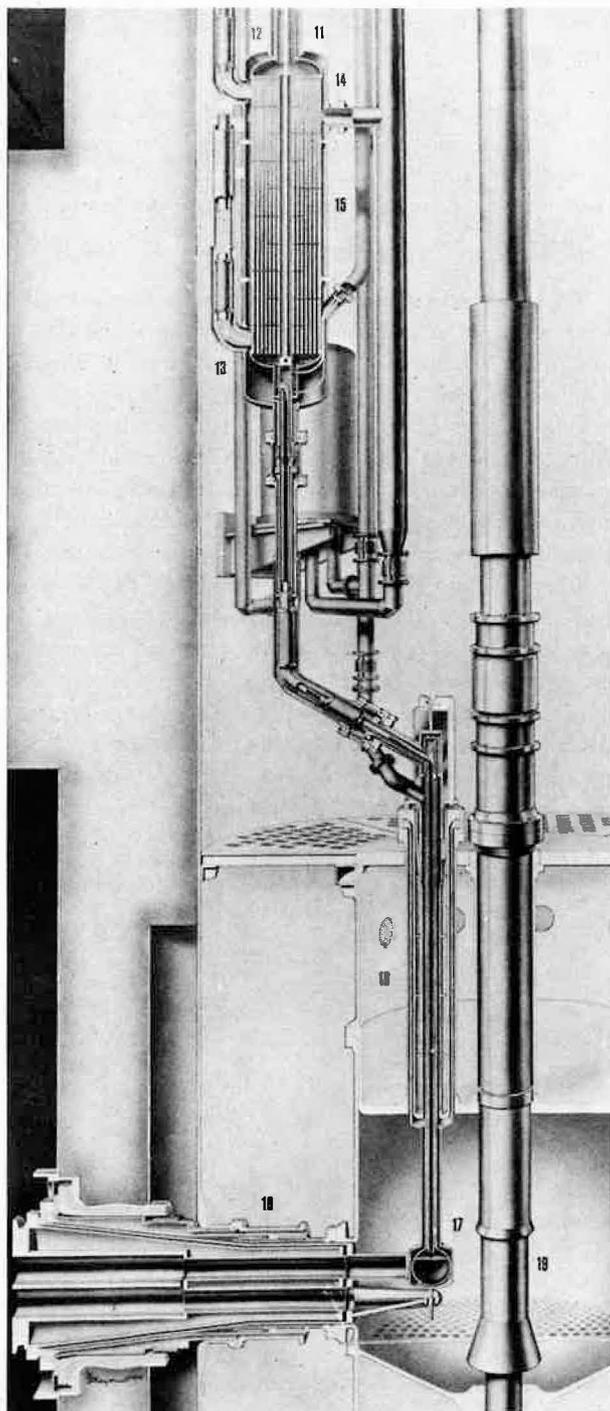


Fig. 2 - Source froide du R.H.F. - Parties en piscine

- 11 - Canalisations de deutérium
- 12 - Sortie d'hélium froid
- 13 - Entrée d'hélium froid
- 14 - Canalisations de pompage
- 15 - Condenseur
- 16 - Partie dans le réflecteur
- 17 - Cellule de deutérium liquide
- 18 - Canal d'extraction des neutrons
- 19 - Coeur du réacteur

1 - La partie en pile (Figure 3)

Elle pénètre verticalement dans l'eau lourde par une cheminée, au-dessus du bidon réflecteur.

La cellule modératrice est une sphère en aluminium non allié, obtenue par formage hydraulique et repoussage. Son épaisseur, aussi faible et constante que possible, est 1,5 mm d'aluminium écroui, sauf au droit des soudures où l'épaisseur est portée à 2 mm.

Elle est enfermée dans une enceinte à vide en zircalloy, d'épaisseur 6 mm, qui épouse la forme de la cellule et de son tube de sortie, de façon à éviter une fuite trop importante de neutrons, puis s'élargit à nouveau dans la cheminée pour recevoir un bouchon de protection rempli d'eau.

L'espace intermédiaire est maintenu sous vide, entretenu par une pompe ionique immergée dans la piscine et sans liaison avec l'extérieur tant que le cryostat est froid.

La pompe ionique est contenue dans un caisson pressurisé avec du néon. Le prévidage de la partie en pile est effectué avant la mise en froid par le groupe de pompage du condenseur à l'aide d'un jeu de vannes formant ensuite un sas.

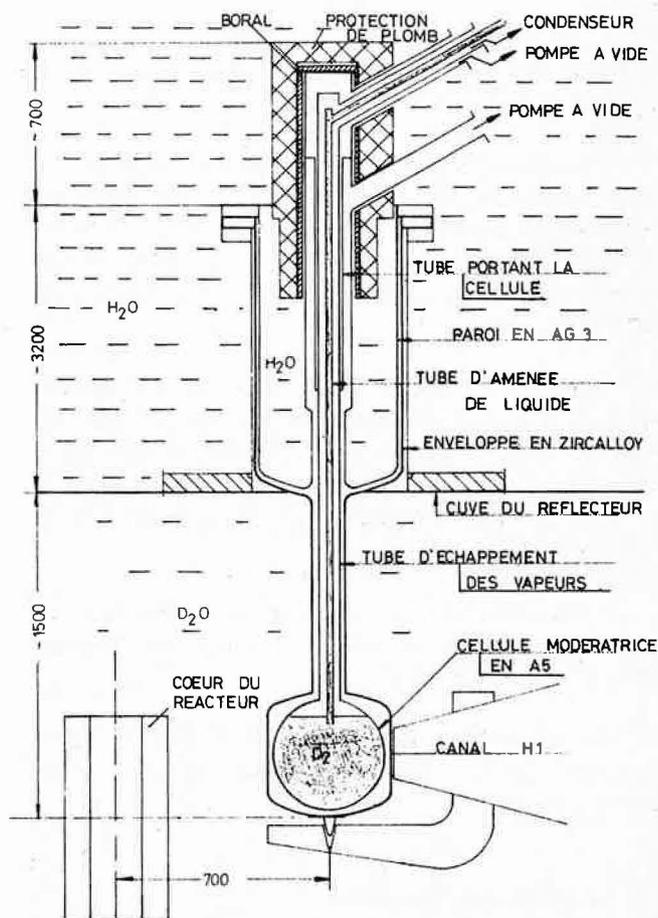


Fig. 3 - Partie dans le réflecteur

2 - Le condenseur

Immergé dans la piscine, il comporte, autour d'un passage central laissant circuler librement le deutérium, un faisceau de 500 tubes verticaux à l'intérieur desquels le deutérium peut se liquéfier. Ces tubes sont refroidis par de l'hélium gazeux et froid provenant du réfrigérateur.

Comme on l'a dit, la liaison avec la partie en pile de la source froide est assurée par un thermosiphon permettant la circulation continue du deutérium dans deux tubes concentriques : descente par gravité du liquide à l'intérieur, remontée du courant gazeux ascendant à l'extérieur.

Condenseur et thermosiphon sont protégés et isolés thermiquement par le vide.

Le groupe de pompage qui entretient ce vide se compose d'une pompe à diffusion d'huile et d'une pompe à palette. Ce groupe, de type classique, est placé sur la margelle piscine et enfermé dans un caisson pressurisé à l'azote pour éviter tout risque d'entrée d'air vers les parties froides du circuit.

3 - Le réservoir tampon

La totalité du deutérium nécessaire à la liquéfaction est contenue sous une pression de 3 bars dans un réservoir de 18 m³ à double enveloppe.

L'enveloppe intérieure est en acier inoxydable et a subi un traitement de surface intérieur (microbillage) pour limiter le taux de dégazage à 10⁻¹⁰ Torr.l.s⁻¹cm⁻². L'espace intermédiaire est rempli de perlite et est maintenu sous atmosphère d'azote à une pression de 1,3 bar environ.

Cette capacité tampon, placée sur le plancher margelle près de la piscine, est reliée au condenseur de deutérium par une canalisation à double enveloppe, protégée par la même pressurisation à l'azote. Cette conduite permet la "respiration" du deutérium entre le condenseur et le réservoir.

Il est prévu que, lors de la phase d'évaporation du deutérium, l'enveloppe intérieure puisse être refroidie par les vapeurs froides.

Des canalisations relient ce réservoir à l'extérieur du réacteur pour permettre éventuellement le rejet contrôlé du deutérium.

B) Le réfrigérateur (Figure 4)

Le réfrigérateur, d'une puissance nominale de 10 kW

à 25° K, utilise de l'hélium et fonctionne suivant un cycle de Brayton.

Un débit de 6,600 Nm³/h est comprimé à 14 bars par deux compresseurs secs à labyrinthes. Cet hélium est refroidi dans une colonne d'échange de 300° K à 28° K puis détendu dans deux turbines à paliers à gaz jusqu'à 2,8 bars, 19° K.

Ce gaz froid est ensuite envoyé au condenseur où il échange de la chaleur avec le deutérium et s'échauffe jusqu'à 25° K puis il retourne à la colonne d'échange où il achève de céder ses frigories au gaz haute pression qui circule en sens inverse. Enfin il retourne aux compresseurs, bouclant le cycle. La régulation entre la haute et la basse pression se fait par vannes asservies. Une capacité tampon de 25 m³ amortit les fluctuations de la quantité totale d'hélium en circulation et permet de stocker la totalité du gaz de cycle à l'arrêt. Le réfrigérateur fonctionne normalement à pleine puissance. La régulation des frigories qui sont fournies au condenseur est obtenue en prélevant une très faible partie du débit d'hélium haute pression et en la mélangeant, à la sortie des turbines, au gaz froid détendu. Ce débit de régulation est piloté par une mesure de la pression du deutérium, c'est-à-dire de sa température, car le circuit de deutérium fonctionne, en somme, comme un bulbe à tension de vapeur saturante (25° K - 1,5 bar).

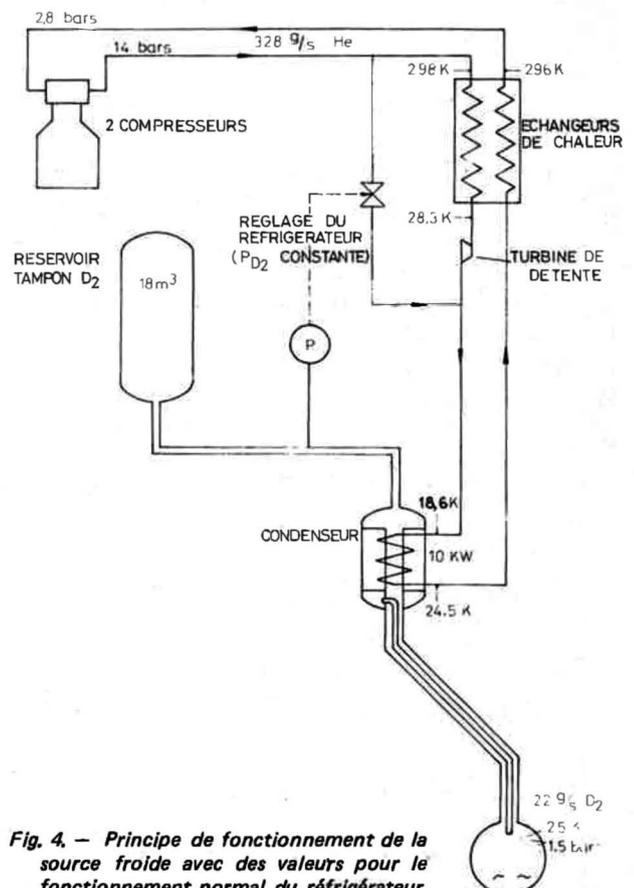


Fig. 4. - Principe de fonctionnement de la source froide avec des valeurs pour le fonctionnement normal du réfrigérateur.

C) - Le tableau de contrôle et de commande

Le tableau de contrôle du réfrigérateur permet un pilotage automatique et une surveillance continue de la réfrigération. Par ailleurs, le contrôle et la commande de l'installation sont assurés par un tableau synoptique, des baies de mesure et une armoire séquentielle commandant l'ensemble des opérations à effectuer sur les circuits.

Le synoptique et les baies d'appareils de mesure permettent une visualisation de l'état de tous les circuits : positions des vannes, fonctionnement des pompes et des appareils, grandeurs caractéristiques de chaque circuit. De plus, des commandes manuelles permettent d'effectuer toutes les opérations nécessaires au fonctionnement et surtout à la mise en condition des circuits en cas de défaillance de la commande séquentielle.

Toutefois, cette procédure n'est envisagée qu'à titre exceptionnel car les consignes de sûreté de l'installation obligent à ce que chaque opération soit assortie de vérifications et d'autorisations dont la complexité est parfois assez grande.

Les "checks lists" de ces opérations ont donc été rassemblées sous forme de séquences logiques dans une armoire comprenant 1700 circuits intégrés où toutes les suites d'opérations autorisées sont préparées à l'avance.

III - FONCTIONNEMENT

La source froide est une installation relativement compliquée du fait des précautions de sécurité qui ont présidé à la réalisation des circuits :

Les opérations de mise en condition (prévidage des circuits de vide, rinçage et remplissage en deutérium, montage de la partie en pile, établissement des gardes de gaz neutre, tests d'étanchéité etc...) sont de ce fait des opérations complexes qui ont dû être analysées dans le détail et sont commandées de façon automatique par l'armoire séquentielle précitée.

Mais le fonctionnement propre de la source reste d'une grande simplicité : c'est pourquoi nous pensons pouvoir obtenir la fiabilité exigée par l'interdépendance de marche entre réacteur et source froide. Cette dernière n'est liée qu'au bon fonctionnement du réfrigérateur et de quatre pompes à vide.

En effet, un cycle de fonctionnement débute par le démarrage du réfrigérateur (compresseurs) et l'ouverture

des vannes d'admission des turbines. Les circuits se refroidissent progressivement jusqu'à ce que le deutérium commence à se liquéfier. La liquéfaction se poursuit d'elle-même ; lorsque la pression du deutérium atteint 1,5 bar, il en a été liquéfié une quantité suffisante pour emplir la cellule au niveau convenable, et sa température est à 25° K. La régulation du réfrigérateur agit alors de façon à compenser l'écart entre la puissance disponible à la sortie des turbines et celle demandée par la source. A partir de ce moment, l'ajustement automatique est assuré pour n'importe quel état de fonctionnement du réacteur.

A l'arrêt de celui-ci, si l'on désire réchauffer la source froide, il suffit de fermer les vannes d'admission des turbines et de recomprimer l'hélium dans la capacité tampon. Le deutérium s'évapore sous l'effet du rayonnement résiduel et des pertes thermiques de l'installation ; il retourne dans la capacité tampon dont la pression augmente jusqu'à 3 bars. C'est là une caractéristique intrinsèque de sécurité de l'installation.

IV - CONCLUSION

La source froide du réacteur à haut flux est le plus important dispositif producteur de neutrons "froids" conçu jusqu'à ce jour. La puissance frigorifique installée pour obtenir ce résultat avoisine celle des plus grosses chambres à bulles à hydrogène liquide. L'expérience acquise dans la réalisation des dispositifs cryogéniques pour irradiations dans les réacteurs piscine a été d'une aide précieuse pour la transposition aux problèmes posés dans un réacteur à haut flux. Aucune extrapolation hasardeuse n'a été faite et les solutions qui ont été adoptées pour résoudre chacun des problèmes rencontrés sont en général éprouvées. La technique de réfrigération choisie est relativement rustique : on l'a préférée pour la fiabilité qu'on est en droit d'attendre au détriment peut-être d'un rendement global élevé ; ce dernier reste néanmoins satisfaisant grâce à l'utilisation des turbines à paliers à gaz.

On pense que les solutions finalement retenues, simples dans leur principe, confirmeront pleinement à l'usage la confiance que l'on a mis en elles.

*
* * *

Le Service des Basses Températures du CEN/Grenoble est l'architecte industriel de cette réalisation, parmi les principaux fournisseurs de laquelle on peut citer les sociétés : "L'Air liquide-CEC Sassenage" pour le réfrigé-

rateur, "W.C. Heraeus-Hanau" pour la partie en pile, "SDMS" 38 Saint-Romans pour les circuits de deutérium et de vide, "Creusot-Loire" à Firminy pour le réservoir de deutérium.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P. AGERON, R. EWALD, H.D. HARIG, J. VERDIER. La source de neutrons froids pour le réacteur à haut flux franco-allemand de Grenoble — En. Nucléaires Vol. 13, N° 1 - 1971 — et Atomwirtschaft XVI - 3 - 1971.
- [2] P. AGERON, Ph. de BEAUCOURT, H.D. HARIG, A. LACAZE, M. LIVOLANT — Experimental and theoretical Study of Cold Neutron Sources of Liquid Hydrogen and Liquid Deuterium — Cryogenics — February 1969
- [3] J.P. MANGIN — Echauffement de la source froide — Rapport DEP/SEPP 762/69 (inédit).
- [4] L. BOCHIROU, P. BRAUNS, G. CLAUDET — Effect of neutronic irradiations at 27 K on the tensile properties of aluminium at 27 K — IFF Washington - Août 1971.
- [5] R. EWALD, P. PERROUD — The flooding phenomenon in a "cold pipe" with vertical counter current two-phase flow of cryogenic fluids — C.R. Conf. ICEC 3, Berlin 1970
- [6] G. DUC, P. PERROUD — Etude expérimentale hydraulique et thermique d'un frigoduc à vaporisation-condensation — Rapport ASP/CEN-G N° 70-09 (inédit).
- [7] H.D. HARIG, H. REUTLER — Résistance du circuit de D₂ de la source froide à une explosion d'un mélange stoechiométrique de deutérium et air. — Rapport PCBT/CEN-G N° 70/211 (inédit).