

SOMMAIRE**LE RÉACTEUR FRANCO-ALLEMAND A HAUT FLUX****2ème Partie**

P. AGERON	
Les possibilités expérimentales. Généralités	5
P. AGERON, J.M. ASTRUC, H. GEIPEL et J. VERDIER	
La source de neutrons froids du réacteur à haut flux	17
G. BOHME, W. DREXEL et F. WUNDERLICH	
La source chaude du réacteur à haut flux	23
J.C. FAUDOU	
Les dispositifs intégrés destinés à la physique nucléaire	27
P. AGERON et P.A. BLUM	
Les conduits de neutrons	35
G. GOBERT	
Les spectromètres de physique du solide	41
J.C. FAUDOU	
Les spectromètres de physique nucléaire	49
M. TAESCHNER	
Gestion automatisée des Expériences	53
Y. DROULERS	
Organisation de l'exploitation	55
J. CHATOUX	
Planning et coûts de l'opération Réacteur à Haut Flux	59
J. CHATOUX	
Principales firmes ayant participé aux études et à la réalisation du réacteur à haut flux	61
Publications récentes du CEA	65

ABONNEMENTS

DUNOD, éditeur, S.A.
92, rue Bonaparte — 75 - Paris (6e)
Téléphone 783-89-63

REDACTION

Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
B.P. N° 2, 91 - Gif - sur - Yvette
Téléphone : 951 80-00, poste 42-80

LE RÉACTEUR
FRANCO-ALLEMAND
A HAUT FLUX

Deuxième Partie

Les possibilités expérimentales Généralités

Par P. AGERON *

Résumé :

Le RHF est essentiellement une source intense de neutrons thermiques pour des expériences dans le domaine de la physique du solide (y compris les applications à la chimie et à la biologie) de la physique nucléaire et éventuellement de la physique du neutron.

La plupart des expériences se font sur faisceaux sortis de neutrons. Les dispositifs intégrés au réacteur sont principalement une source de neutrons froids, une source de neutrons chauds, des canaux tangentiels, des canaux traversiers, des conduits de neutrons. Ils desservent des spectromètres de différents types. Les caractéristiques des faisceaux au point d'utilisation sont fournies, ainsi que les caractéristiques principales des différents appareils.

Summary :

The HFR is basically a strong source of thermal neutrons for experiments in the fields of solid state physics (including chemical and biological applications), nuclear physics and possibly neutron physics.

Most of the experiments are performed on extracted neutron beams. The equipment integrated to the reactor consists chiefly of a cold neutron source, a hot neutron source, tangential channels, through tubes and neutron ducts, which serve spectrometers of different types. The beam characteristics at the utilization point are given together with the main specifications of the various instruments.

Zusammenfassung :

Der HFR bildet im Wesentlichen eine intensive Quelle thermischer Neutronen für Untersuchungen im Gebiet der Festkörperphysik - verbunden mit Anwendungen in der Chemie und der Biologie -, der Kernphysik und eventuell auch der Neutronenphysik.

Die meisten Versuche werden mit austretenden Neutronenstrahlenbündeln ausgeführt. Die im Reaktor integrierten Vorrichtungen bilden hauptsächlich eine Quelle kalter Neutronen, eine Quelle heisser Neutronen, tangentielle Kanäle, Querkanäle und Neutronenleiter. Sie bedienen verschiedene Spektrometer. Es werden die Charakteristiken der Bündel am Arbeitsort, sowie die Kenndaten der verschiedenen Apparate angegeben.

I - BUT DU REACTEUR ET EXIGENCES DES DIFFERENTS TYPES D'EXPERIENCES

Le réacteur à haut flux est essentiellement une source intense de neutrons thermiques pour des expériences dans le domaine de la physique du solide (y compris des applications à la chimie et à la biologie), de la physique nucléaire et éventuellement de la physique du neutron.

La plupart de ces expériences se font sur faisceaux sortis de neutrons thermiques, aussi dépourvus que possible de neutrons rapides, intermédiaires, et de gammas. Bien que le réacteur soit une source intense de ces derniers types de rayonnement, la possibilité d'en extraire des faisceaux a été exclue. De même, toute possibilité d'installer des irradiations importantes (par exemple production importante de transuraniens) a été écartée, ceci dans le but de spécialiser le réacteur dans la production de faisceaux de neutrons thermiques aussi intenses et aussi nombreux que possible.

* Institut Max von Laue - Paul Langevin - CEDEX 156F, 38 Grenoble gare.

Les expériences de physique du solide demandent des faisceaux bien collimatés (divergence angulaire inférieure à $2,10^{-2}$ radian) de neutrons thermiques ayant des énergies comprises entre 0,5 eV et 10^{-3} eV (longueur d'onde comprise entre 0,4 et 15 Å) autant que possible dépourvus de neutrons rapides ou en ralentissement, sources de bruit de fond.

Les expériences de physique nucléaire sont de deux types :

- Expériences où la cible est placée hors pile sur un faisceau sorti aussi pur que possible, de façon à éviter les réactions à seuil ou les captures résonnantes parasites et les gammas parasites. Ces expériences n'ont pas d'exigence en ce qui concerne la divergence du faisceau ou le choix de la longueur d'onde. On cherche seulement à rendre maximal le taux de capture dans des échantillons minces, c'est-à-dire que ce qui compte c'est non pas le flux, mais le flux pondéré par la réponse d'un détecteur la plupart du temps en $1/V$,
- Expériences où la cible est placée à l'intérieur même du réacteur et où l'on extrait un faisceau du rayonnement induit par la capture (produits de fission, gammas de capture, électrons de conversion). Il est essentiel alors d'éviter la sortie de tous rayonnements autres que ceux issus de la cible, ce qui conduit notamment à supprimer ou à éloigner du flux le fond de canal.

Les éventuelles expériences de physique de neutrons se feraient dans des conditions particulièrement favorables au moyen de neutrons de très basse énergie (jusqu'à 10^{-6} ou 10^{-7} eV). Les moyens pour produire et transporter de tels neutrons, ne sont pas encore définis et ne seront pas étudiés ici.

Pour satisfaire ces différentes exigences, il a été prévu des dispositifs parmi lesquels on peut distinguer :

- Les dispositifs intégrés au réacteur, c'est-à-dire situés en totalité ou en partie dans le réacteur, et destinés à produire (modérateurs spéciaux) ou à extraire (canaux, conduits) les neutrons du réacteur,
- Les dispositifs non intégrés au réacteur, c'est-à-dire situés hors du réacteur et destinés à conditionner (monochromation, pulsation etc...) le faisceau de neutrons incident sur l'échantillon et à analyser les neutrons diffusés.

II – LES DISPOSITIFS INTEGRES AU REACTEUR

Ce sont principalement :

- Une source de neutrons froids (V_1) qui est un modérateur (25 dm³ de deutérium liquide) à basse température (25° K). Elle augmente localement, de façon importante, le flux de neutrons thermiques pour des longueurs d'onde supérieures à 4 Å.
- Une source de neutrons chauds (V_2) qui est un modérateur (10 dm³ de graphite) à haute température (environ 2000° K). Elle augmente localement, de façon importante, le flux de neutrons thermiques dans le domaine de longueurs d'onde compris entre 0,4 et 0,8 Å.
- Des canaux tangentiels c'est-à-dire non en vue directe du coeur du réacteur, de façon à diminuer le flux sortant de neutrons rapides (d'un facteur 10 environ en raison de leur anisotropie) et de gammas (ils se réduisent alors pratiquement aux seuls gammas de capture du fond de canal) en provenance du coeur. Il y a :
 - a) 6 canaux horizontaux : H5, H9, H10, H11, H12, H13 et 2 canaux inclinés vers le haut : IH₃, IH₄, regardant l'eau lourde ;
 - b) 3 canaux horizontaux : H₃, H₄, H₈ et 1 canal incliné vers le haut : IH₂, regardant la source chaude ;
 - c) 1 canal incliné vers le haut : IH₁, regardant la source froide.
- Des conduits de neutrons : ils utilisent la réflexion totale des neutrons, l'angle de réflexion totale étant proportionnel à la longueur d'onde des neutrons ; par exemple, γ_C (radian) = $1,73 \cdot 10^{-3} \lambda$ (Å) pour le nickel. Courbés, ils permettent d'éliminer presque totalement les neutrons en ralentissement et les gammas provenant de la source. Il est prévu :
 - 5 conduits : H₁₄, H₁₅, H₁₆, H₁₇, H₁₈, regardant la source froide ;
 - 5 conduits : H₂₁, H₂₂, H₂₃, H₂₄, H₂₅, regardant l'eau lourde.

Les caractéristiques des différents canaux et conduits sont indiquées dans le tableau I.

TABLEAU I

Caractéristiques des faisceaux au point d'utilisation

Type de canal						Flux thermique	Flux (1) de capture	Flux épithermique	Flux rapide	Flux gamma
						n/cm ² /s				mrem/h
Canal tangentiel point d'utilisation à 5 m du fond du canal	Visant l'eau lourde (section 80 cm ²)					2,5.10 ¹⁰	2,2.10 ¹⁰	2.10 ⁹	3,8.10 ⁷	} 3.10 ⁶
	Visant la source froide (section 80 cm ²)					1,6.10 ¹⁰	3,9.10 ¹⁰			
	Visant la source chaude (section 100 cm ²)							4,8.10 ⁸	2,6.10 ⁷	
	N°	longueur (m)	L ₁ (m) (2)	R (m) (3)	λ (Å) (4)					
Conduits de neutrons thermiques	H ₂₁ H ₂₂	87	79,1	27000	0,88	2,4.10 ⁹	3.10 ⁹	3	1	100 à 10 cm
	H ₂₃	82	68,3	20000	1	2,2.10 ⁹		5	1,5	10 à
	H ₂₄	72	57,5	14000	1,22	2,1.10 ⁹		12	3	1 m
	H ₂₅	52	45	9000	1,52	1,8.10 ⁹	2,7.10 ⁹	30	8	
Conduits de neutrons froids	H ₁₄ H ₁₅ H ₁₆	27 55 27	25,5	2700	2,78	1,4.10 ¹⁰	7,3.10 ¹⁰	12	5	500 à 10 cm
	H ₁₇	16	6	150	11,8	5,5.10 ⁹		0,003	0,001	50 à
	H ₁₈	10	2,5	25	29	1,3.10 ⁹	1,3.10 ¹⁰	0,2	0,08	1 m

(1) Flux de capture = $\int \varphi(\lambda) \times \frac{\lambda}{\lambda_{(2200\text{ m})}} d\lambda$

- (2) Longueur minimale de vue directe
- (3) Rayon de courbure
- (4) Longueur d'onde caractéristique

— Des canaux traversiers : Il est prévu :

- a) un tube traversier horizontal, avec une sortie de faisceau à chaque bout : H₆-H₇ :
- b) un tube semi-traversier presque vertical : V₃, avec une sortie de faisceau uniquement vers le haut, le bas du canal étant bouché, mais situé au-delà du réflecteur d'eau lourde, à une distance suffisante pour qu'il constitue une source tolérable. Un autre tube vertical, donnant à l'ensemble du canal une

forme de "Y" permet l'introduction de cibles par une voie différente de celle servant à la sortie du faisceau.

- Des tubes pneumatiques et d'irradiation. Par ailleurs, il est prévu diverses positions d'irradiation de faible section, d'accès vertical, avec transfert des échantillons soit mécanique : V₄, soit pneumatique : V₅ V₆ et V₃.

Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau II.

TABLEAU II

Positions et types des dispositifs d'irradiations

	Distance à l'axe du coeur (cm)	Flux thermique (n/cm ² /s)	Flux rapide phosphore (n/cm ² /s)	Rapport th/rap	Echauffement nucléaire (W/g)	Type et temps de transfert	Temps d'irradiation	Echantillon Poids (g) Section efficace (barn)	Cartouche Matière et poids Diamètre φ (mm) Longueur L (mm)
Hors du réflecteur d'eau lourde	130 V ₃	5 x 10 ¹³	5 x 10 ⁸	10 ⁵	① 0,08 ② 0,02 0,10	Pneumatique direct long 20 à 30 s	20 s	1 g 1 b	Environ 15 g de polyéthylène φ = 36 (53 avec centreurs) Tube de 55/60 L = 100
Dans le réflecteur d'eau lourde	100 V ₅	2,5 x 10 ¹⁴	10 ¹⁰	2,5 x 10 ⁴	① 0,04 ② 0,10 0,14	Pneumatique direct long 20 à 30 s	20 s	1 g 1 b	
	80 V ₄	5 x 10 ¹⁴	8 x 10 ¹⁰	6 x 10 ³	① 0,1 ② 0,2 0,3	Indirect (Château de Plomb)	1 cycle (40 jours)	plusieurs g. 1 b	Environ 20 g Al φ = 25 mm L = 80 mm
	35 V ₆	1,5 x 10 ¹⁵	2 x 10 ¹³	75	① 2,4 ② 0,6 3,0	Pneumatique direct court 2 à 3 s		quelques milli-grammes	Inférieure à 20 g Al φ ≤ 20 mm

- ① Chauffage gamma dû au coeur et à la cuve
② Estimation du chauffage gamma sur l'échantillon dû aux captures dans le dispositif même.

La figure 1 donne la configuration des différents canaux et indique notamment la distance de leur "nez" à l'axe du réacteur.

La figure 2' donne, en fonction de la distance à l'axe du réacteur, dans le plan médian du coeur :

- le flux de neutrons thermiques
- le flux de neutrons rapides (E > 1 MeV)
- le flux de neutrons épithermiques
- l'échauffement dû aux gammas du coeur et des structures.

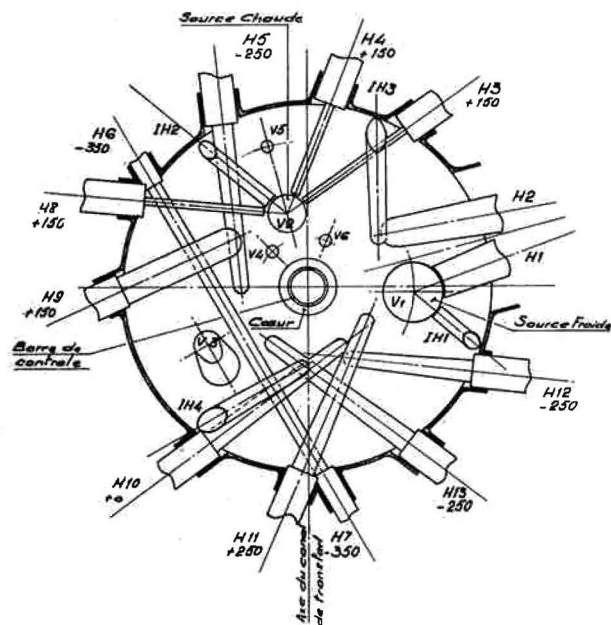


Fig. 1. - Disposition des canaux dans le réflecteur

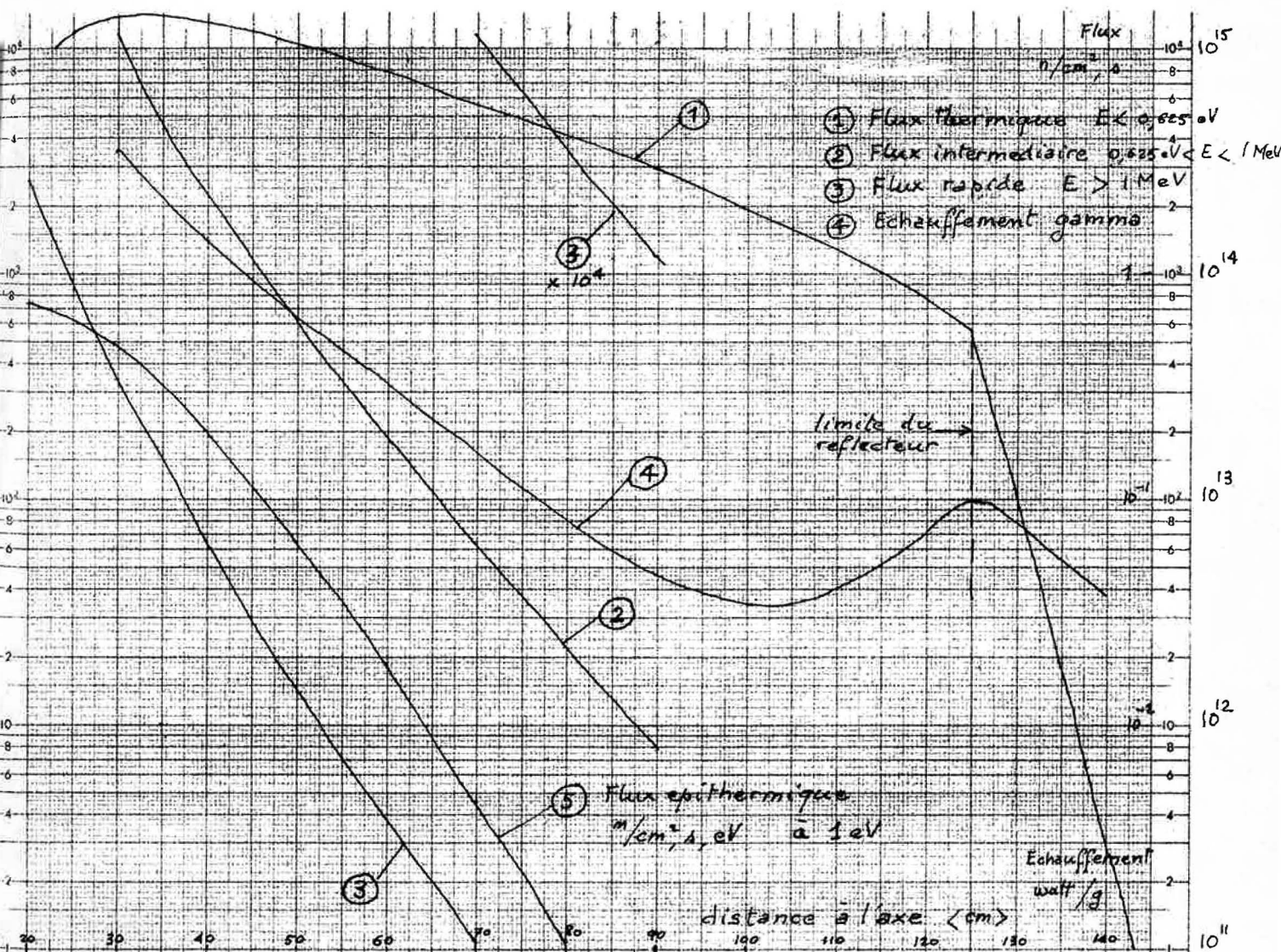


Fig. 2. - Les différents flux, dans le plan médian, en fonction de la distance au coeur

La figure 3 indique les spectres des neutrons thermiques sortant en direction du canal, respectivement :

- de la source chaude
- de l'eau lourde à 45 cm de l'axe réacteur
- de la source froide

La figure 4 indique le spectre des neutrons rapides et épithermiques sortant en direction d'un canal tangentiel à 45 cm de l'axe réacteur.

La figure 5 indique les spectres des neutrons thermiques à la sortie des différents canaux et conduits.

La figure 6 montre la forme des canaux tangentiels ainsi que les différents types de bouchons qui les équipent.

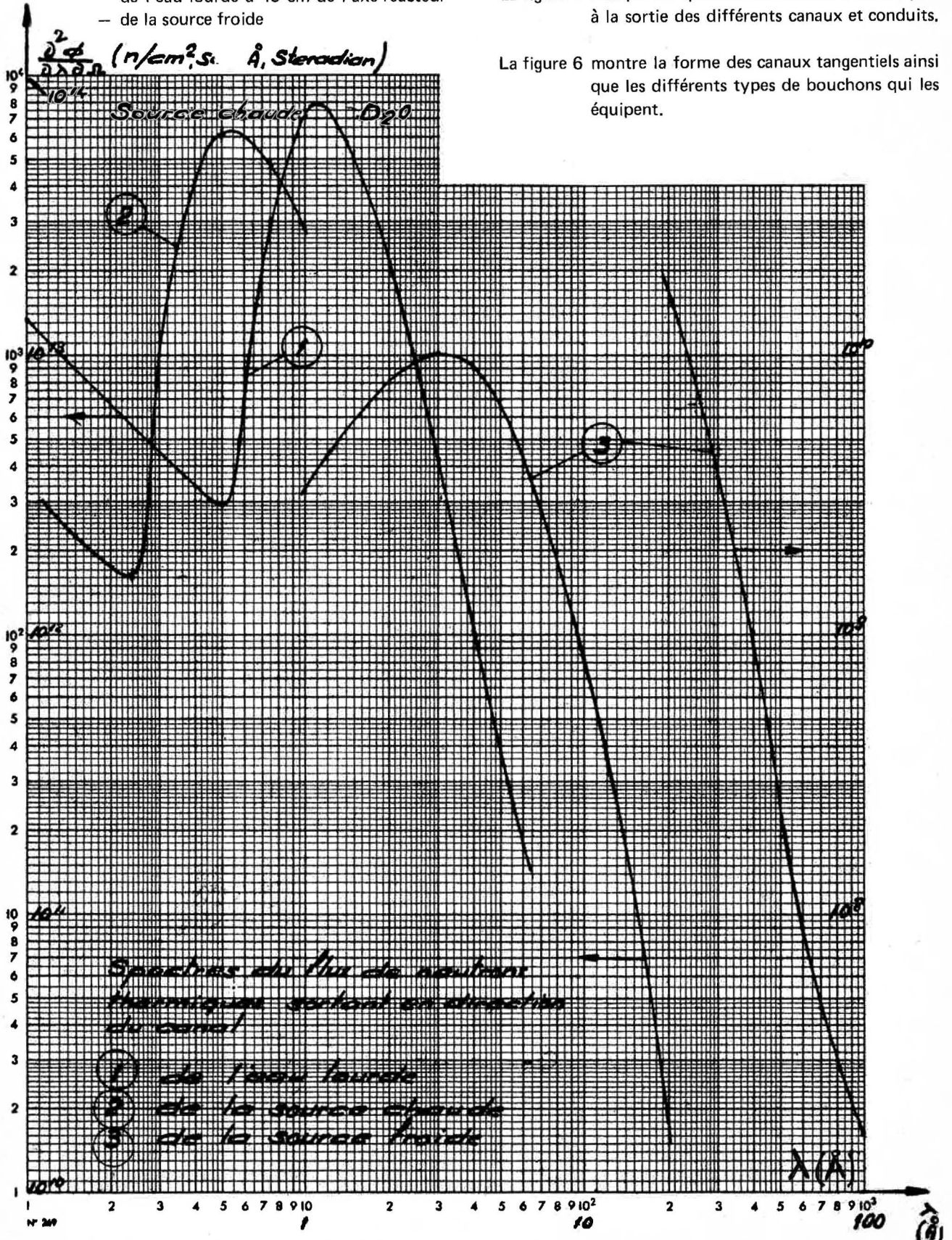


Fig. 3. - Spectres des neutrons thermiques sortant dans la direction d'un canal

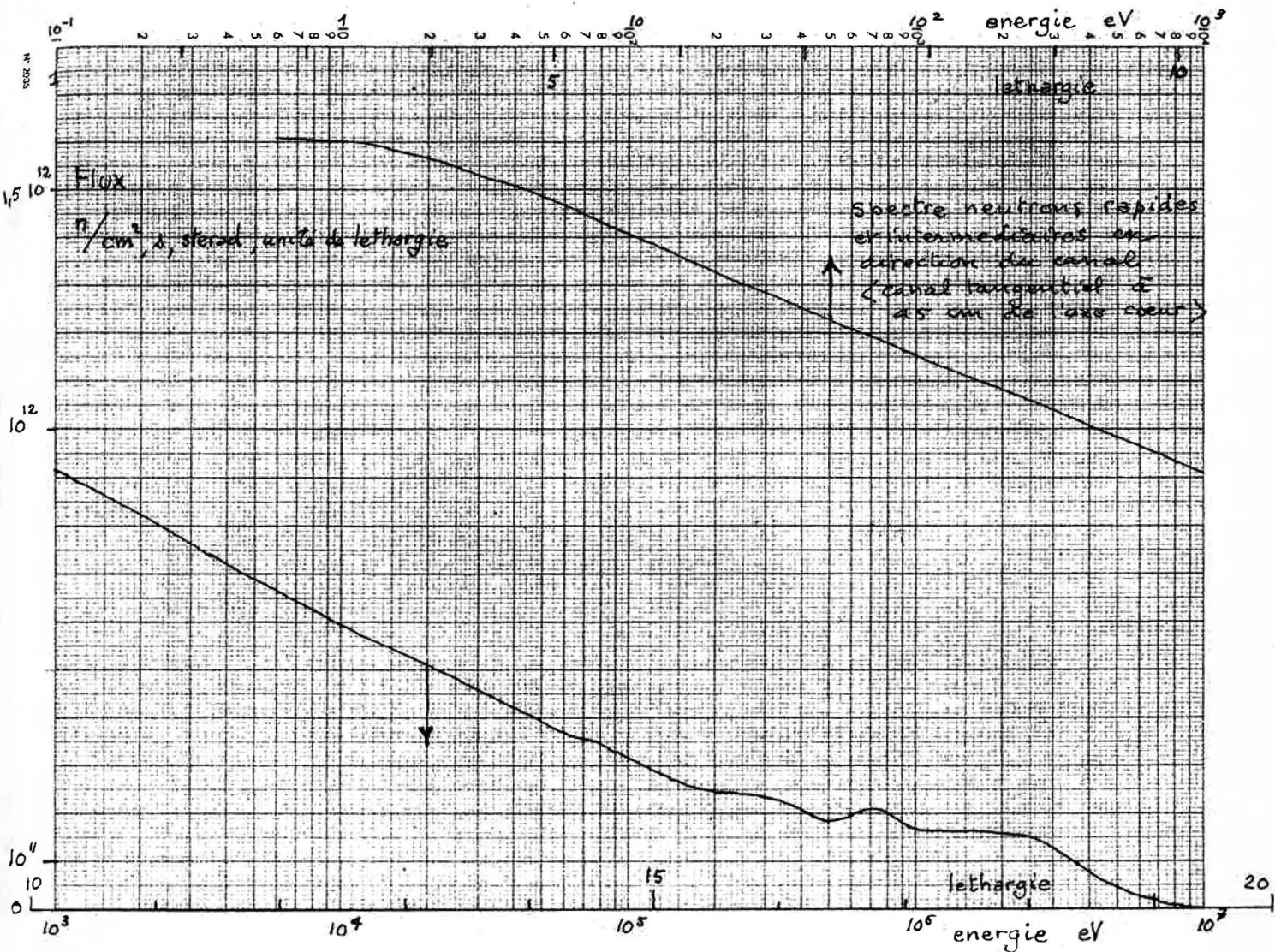


Fig. 4. — Spectres des neutrons rapides et épithermiques sortant par un canal tangentiel

III – DISPOSITIFS NON INTEGRES AU REACTEUR : SPECTROMETRES

Les différents appareils prévus pour les expériences de diffraction ou de diffusion neutroniques sont chacun de conception et de possibilités différentes mais présentent quelques caractéristiques communes.

Dans un appareil classique, un cristal monochromateur placé dans le faisceau primaire, dévie dans une certaine direction (angle $2 \theta_M$) (faisceau secondaire) une longueur d'onde déterminée, variable en faisant tourner le cristal autour d'un axe vertical. Les neutrons du faisceau secondaire diffusés par l'échantillon (à un angle φ), sont soit comptés dans les différentes directions par un compteur mobile autour de l'échantillon (diffractomètre à 2 axes, pour la diffusion élastique, canal H11) soit analysés en longueur d'onde au moyen d'un cristal

mobile autour de l'échantillon, avec un détecteur mobile autour de l'analyseur (angle $2 \theta_A$) (spectromètre à 3 axes, pour diffusion inélastique, canal H₄).

Si l'échantillon doit se trouver dans une ambiance particulière (haute ou basse température, champ magnétique, haute pression) nécessitant un appareil lourd et difficilement mobile, on peut laisser fixe l'échantillon et déplacer le monochromateur dans le faisceau primaire (canal H₈).

Pour diminuer le bruit de fond (gammas, neutrons rapides) dans le faisceau secondaire, on peut utiliser 2 monochromateurs en série (canal H₁₃).

Dans les expériences où l'analyse en énergie des neutrons diffusés par l'échantillon se fait en temps de vol, on peut obtenir des pulses monochromatiques soit par un cristal tournant (canal H₁₂) soit par "chopper" mécanique (canal H₁₆), soit par chopper "électronique"

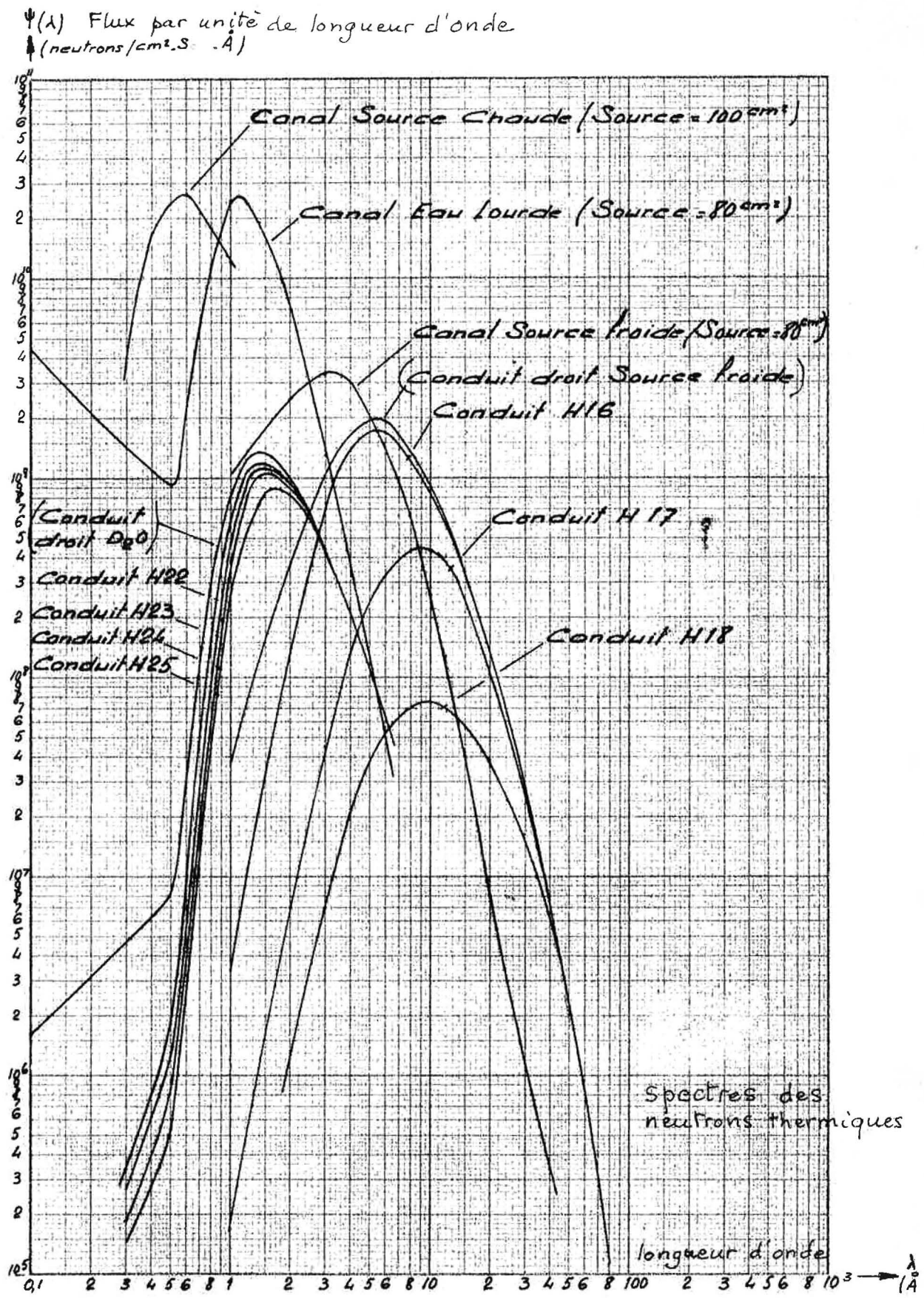


Fig. 5. — Spectres de neutrons thermiques à la sortie des différents canaux et conduits

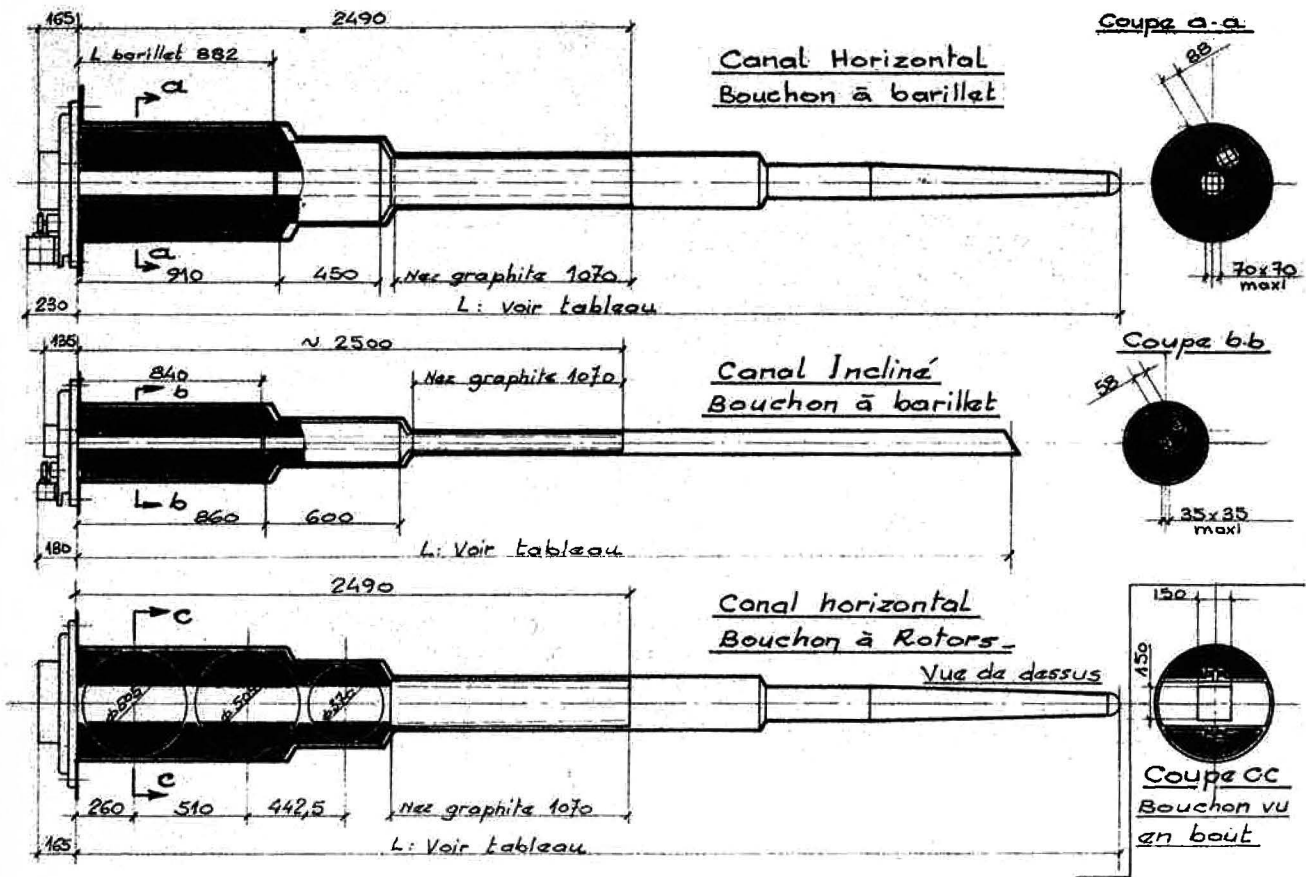


Fig. 6. - Les canaux tangentiels

(en faisant varier la section efficace du cristal monochromateur par un champ magnétique commandé électroniquement).

Pour les expériences de diffusion aux petits angles, un faisceau à collimation très fine est obtenu par un collimateur très long (40 m) avec des détecteurs pouvant être éloignés jusqu'à 40 m de l'échantillon (conduit H_{15}).

Lorsque, pour augmenter la résolution, il faut éloigner le monochromateur, l'échantillon et l'analyseur à des distances pouvant atteindre 10 m, ces différents éléments ne sont plus portés par un même appareil, mais disposés sur des tables indépendantes, mobiles sur coussins d'air, sur un sol très lisse dit "Tanzboden" (utilisé sur différents canaux et conduits).

Ces expériences ont cependant deux points communs :

- Elles sont complètement indépendantes du réacteur :

une membrane est placée sur le faisceau primaire à la sortie du réacteur.

- Elles posent, au niveau du monochromateur, des problèmes de protection identiques. Le monochromateur, par exemple un cristal de cuivre de $5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ constitue une source de neutrons rapides diffusés et de gammas de capture durs nécessitant une protection d'environ 80 cm de béton au fer de densité 5,4 (protection solide) ou de 50 cm de fer plus 50 cm d'eau (qui peut être réalisée sous forme d'une piscine : canal H_3).

En raison de la section importante des canaux (jusqu'à $15 \times 15 \text{ cm}^2$) et des conduits ($20 \times 3 \text{ cm}^2$) il est envisagé de placer jusqu'à deux ou trois appareils différents sur chaque faisceau primaire.

Les caractéristiques principales des différents appareils actuellement prévus sont données dans le tableau III*

* Rédigé A : par F. VOLINO
B : par J.C. FAUDOU

TABLEAU III

A – Dispositifs de diffusion de neutrons près du réacteur à haut flux de Grenoble

1 - DIFFUSION ELASTIQUE

Appareil *	Longueur d'onde (Å)	Particularités	Physiciens ILL**
D1 Double diffractomètre à poudre (Avril 1972)	2 (D1 A) 3 (D1 B)	Multidétecteur pour $0^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ pour $\lambda = 2\text{Å}$ (D1A) $K_{\text{max.}} = 0,64 \text{Å}^{-1}$ Compteur BF_3 orientable entre $0^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$ pour $\lambda = 3\text{Å}$ (D1B) $K_{\text{max.}} = 0,58 \text{Å}^{-1}$	M. CONVERT
D2 Diffractomètre (Déc. 1971) sans champ magnétique	de 0,94 à 2,2 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 8 \cdot 10^{-3}$	$-100^\circ \leq 2\theta \leq 120^\circ$ position de l'échantillon $0^\circ \leq \Omega \leq 360^\circ$ orientation de l'échantillon par rapport au champ magnétique variable - Champ magnétique jusqu'à 80 kilogauss.	E. ROUDAUT
D4 Diffractomètre à liquide	Les informations seront fournies ultérieurement		
D5 Spectromètre 3 axes pour neutrons polarisés : sur la source chaude (Janvier 1972)	0,6 à 1	Mesures de diffusion élastique et inélastique avec et sans orientation de spin (spin flip) ; angle de diffusion maximum 135° $K_{\text{max.}} = 9,4 \text{Å}^{-1}$ pour $\lambda = 0,6 \text{Å}$	TASSET
D6 Diffractomètre à mono cristal par la méthode de diffraction de LAUE modifiée	1 à 4	100 compteurs BF_3 placés à l'intérieur d'une sphère de 1,7 m de diamètre pour des échantillons de 1mm^3 de volume environ. Cristal monochromateur courbe ou en lamelles.	B. KLAR
D7 Diffusion diffuse sur la source froide (Juillet 1972)	3 à 6 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 2 \cdot 10^{-2}$	32 détecteurs sur 4 bras à une distance de 40 à 130 cm de l'échantillon, discrimination de la diffusion inélastique par méthode de temps de vol.	W. JUST
D8 Diffractomètre à 4 cercles (Décembre 1971)	0,9 à 2,2 $8 \cdot 10^{-3} < \frac{\Delta\lambda}{\lambda} < 4 \cdot 10^{-2}$	$-100^\circ \leq 2\theta \leq 130^\circ$ $K_{\text{max.}} = 6 \text{Å}^{-1}$ pour $\lambda = 0,9 \text{Å}$ Pas d'orientation du cristal. Complètement automatique.	E. ROUDAUT
D9 Diffractomètre à 4 cercles sur la source chaude (Avril 1972)	0,6 à 1,1	Principale application : structures des grosses molécules avec diffusion anormale du Cd^{113} et Sm^{149}	A. TIPPE
D10 Spectromètre 3 axes à 4 cercles (Juin 1971)	1 à 3	D10 A - Diffusion élastique des neutrons pour petits monocristaux $2 \text{Å}^{-1} \leq K \leq 10 \text{Å}^{-1}$ Analyse en énergie des neutrons diffusés possible entre 0,08 et 0,01 et résolution $2 \cdot 10^{-3}$ Possibilité de cryostat - Système TANZBODEN D10 B - Diffractomètre 4 cercles classique	A. TIPPE

* Entre parenthèses : la date présumée de la mise en service.

** Les physiciens de l'Institut Max von Laue - Paul Langevin - CEDEX 156 - F 38 - GRENOBLE-Gare peuvent fournir des informations plus détaillées.

Appareil *	Longueur d'onde (Å)	Particularités	Physiciens ILL **
D11 Diffusion aux petits angles sur la source froide (Juillet 1972)	5 à 7 $\Delta K \geq 5 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}^{-1}$	Distances sélecteur - échantillon et échantillon - détecteur pouvant atteindre 40 m ; discrimination de la diffusion inélastique par temps de vol.	K. IBEL
D12 Diffractomètre de LAUE modifié (Juin 1972)	1 à 4	Détection photographique - Détermination de l'intensité à $\pm 5\%$. Par focalisation du faisceau, les réflexions nh, nk, nl pour différents n ne sont pas superposées.	P. THOMAS

2 - DIFFUSION INELASTIQUE

Appareil	Longueur d'onde (Å)	Particularités	Physiciens ILL
IN1 Spectromètre 3 axes sur la source chaude (Mai 1972)	0,4 à 0,9 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \geq 10^{-2}$	Faisceau de 5 x 5 cm. Angle de diffusion de -72° à $+105^\circ$. 2 systèmes d'analyse.	D. TOCHETTI
IN2 Spectromètre 3 axes (Mai 1972)	0,9 à 4 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \geq 5 \cdot 10^{-3}$	Faisceau 7 x 7 cm ou 5 x 5 cm - double monochromateur. Angle de diffusion -140° à $+170^\circ$. Haute résolution en énergie (supérieure à 1%)	G. DUESING
IN3 Spectromètre 3 axes TANZBODEN sur guide de neutrons thermiques (Juillet 1972)	2 à 6 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \geq 5 \cdot 10^{-3}$	Distances monochromateur - échantillon - analyseur - détecteur variables entre 0,5 m et 5 m. Focalisation optimale avec cristal courbe et variation des distances. Haute résolution en énergie (1%).	E. SCHEDLER J. KALUS
IN4 Spectromètre temps de vol à cristal tournant		Pour transferts d'énergie et de moments élevés $K_{\max} \approx 14 \text{ \AA}^{-1}$ $\frac{\Delta K}{K} \geq 0,06$ $\hbar\omega_{\max} \approx 100 \text{ meV}$ $\frac{\Delta\omega}{\omega} \geq 0,01$ $-6,25^\circ \leq 2\theta \leq 157,75^\circ$ 102 compteurs He^3 montés sur 17 chariots portant 12 compteurs.	NUCKER
IN5 Multichopper temps de vol sur la source froide (Juillet 1972)	4 à 16 $2,5 \cdot 10^{-3} \leq \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \leq 10^{-2}$	Faisceau 2 x 5 cm - 4 choppers - Multidétecteur He^3 . Nombre d'angles maximum ; 32 $0,72 \text{ \AA}^{-1} < K_{\max} < 2,90 \text{ \AA}^{-1}$ $0,5\% < \frac{\Delta E}{E} < 2\%$ $6,310^{-3} < \frac{\Delta K}{K} < 25 \cdot 10^{-3}$	F. DOUCHIN
IN6 Spectromètre 3 axes sur la source chaude	0,45 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \geq 10^{-3}$	Monochromateur à angle fixe ($2\theta = 23^\circ$). Faisceau 5 x 15 cm. Distances échantillon - analyseur - détecteur variables jusqu'à 3 m. Avec cristal courbe, haute résolution pour la partie horizontale des courbes de dispersion. Angle de diffusion $\leq 30^\circ$ Meilleure résolution $\frac{\Delta K}{K} \approx 10^{-3}$ $\Delta E \approx 1 \text{ meV}$	D. MARX

* Entre parenthèses : la date présumée de la mise en service.

** Les physiciens de l'Institut Max von Laue - Paul Langevin - CEDEX 156 - F 38 - GRENOBLE-Gare peuvent fournir des informations plus détaillées.

B – Spectromètres de physique nucléaire

Appareil	Particules analysées et énergie	Particularités	Physiciens
Spectromètre de masse à parabole pour produits de fission "LOHENGRIN"	Produits de fission	Séparation totale des masses ($\frac{M}{\Delta M} \leq 800$) Résolution en énergie $\frac{\Delta E}{E} = 1\%$ Temps de vol dans le spectromètre : 1 μ s. – Domaine d'application 1) Distribution des produits de fission en fonction de A, Z, E_{cin} 2) Spectroscopie des noyaux riches en neutrons 3) Interaction des ions lourds avec la matière	E. MOLL (ILL) ASGHAR (ILL) SCHRADER (ILL) SISTEMICH (ILL)
Spectromètre pour électrons de conversion "BILL"	Electrons 50 keV à 10 MeV	2 aimants à secteurs alternativement homogène et inhomogène. Rayon de courbure 50 cm, angle de déviation 58° et 290° angle solide 5.10^{-6} radian. Résolution espérée : $\frac{\Delta E}{E} = 4.10^{-4}$	B. MAIER (ILL) W. MAMPE (ILL)
3 spectromètres à cristal courbe 2 avec rayon 24 m 1 avec rayon 5,76 m	χ de captures des neutrons thermiques 300 keV à 2 MeV 20 keV à 300 keV	Utilisent le quartz 110 ($2d = 4,9 \text{ \AA}$) 5 ordres de réflexion Interféromètre pour atteindre une précision d'angle < 0,1" résolution 1 à 4". Meilleure résolution pour 500 keV : 0,12 keV	R. KOCH (ILL) PINSTON (ILL) ROUSSILLE (ILL)
Spectromètre anti compton pour γ de captures des neutrons thermiques	100 keV à 3 MeV	Diode Ge (Li) entourée d'un scintillateur plastique cristal INa dans l'axe du faisceau Résolution espérée : 1,5 keV à 661 keV Rapport $\frac{Pic}{Compton} = 300$ à 661 keV.	M. FANGER (GfK)

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.

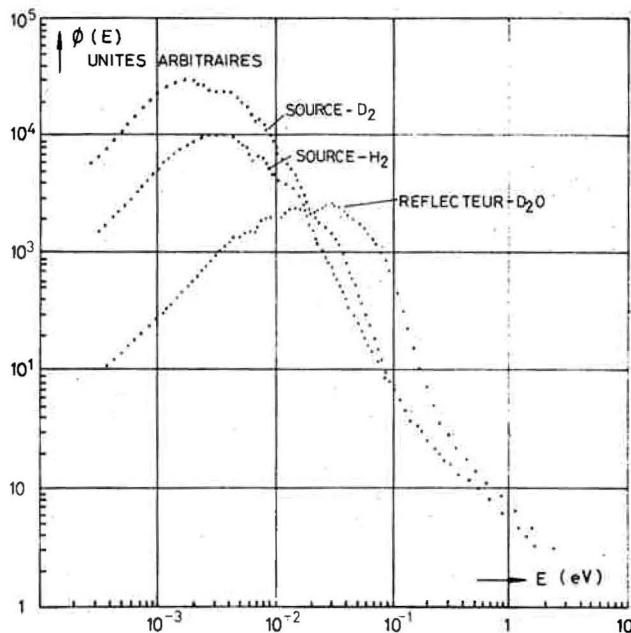


Fig. 1. — Spectres mesurés avec et sans source froide

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.

TABEAU

Echauffement moyen de la source froide

Echauffement de	par	W/g							W/cm ³	W/cm ²	W	W TOTALE	
		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.

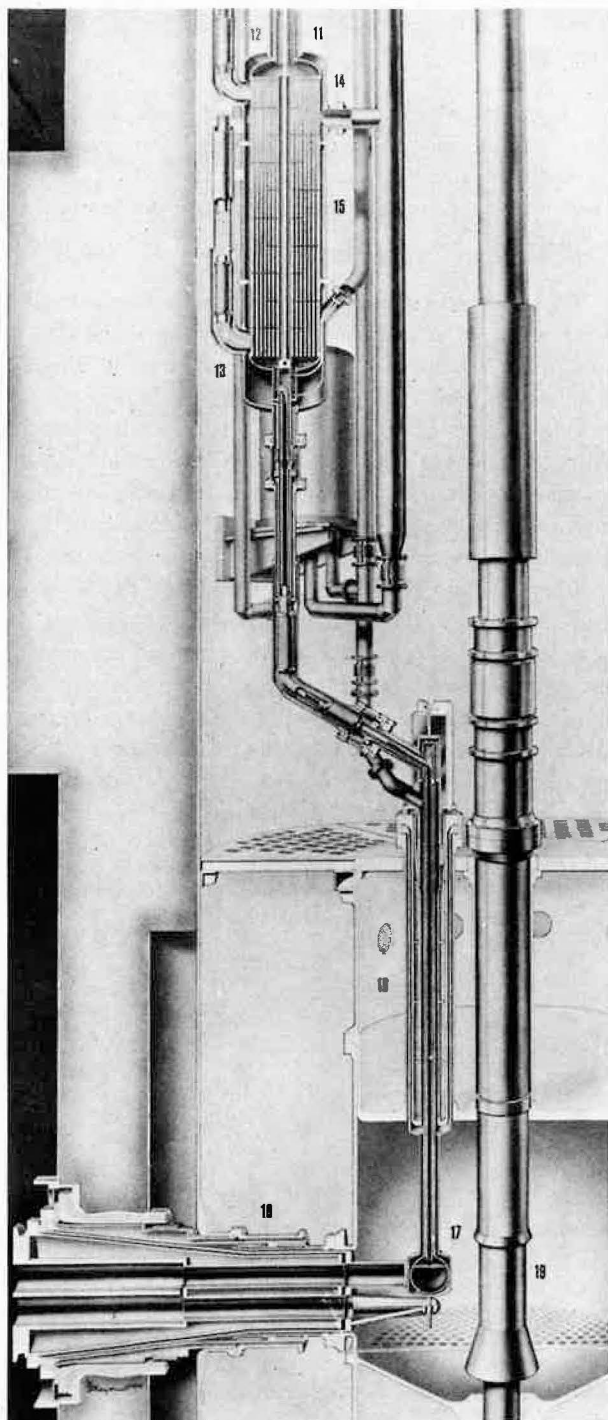


Fig. 2 - Source froide du R.H.F. - Parties en piscine

- 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.

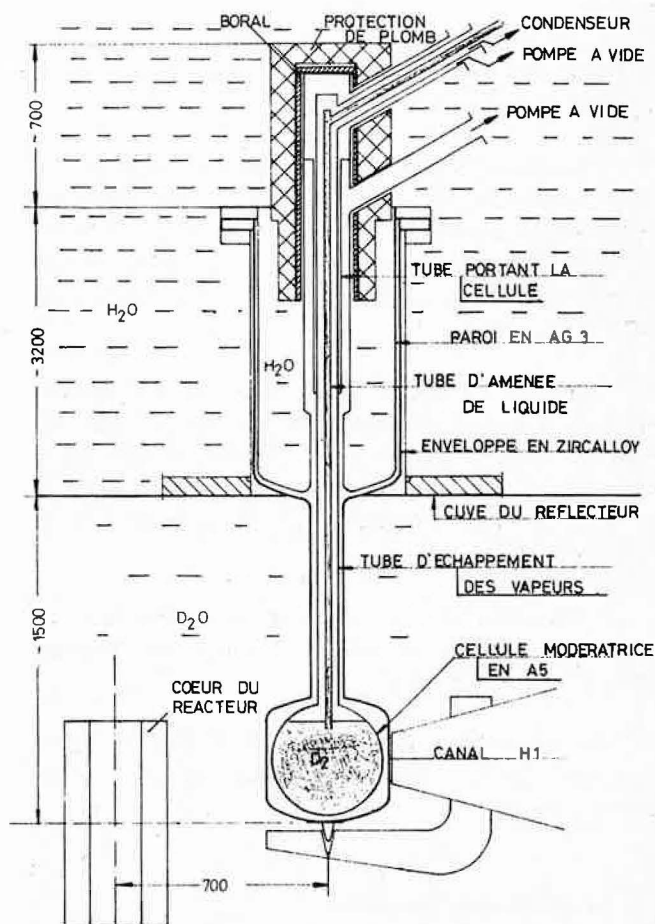


Fig. 3 - Partie dans le réflecteur

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).

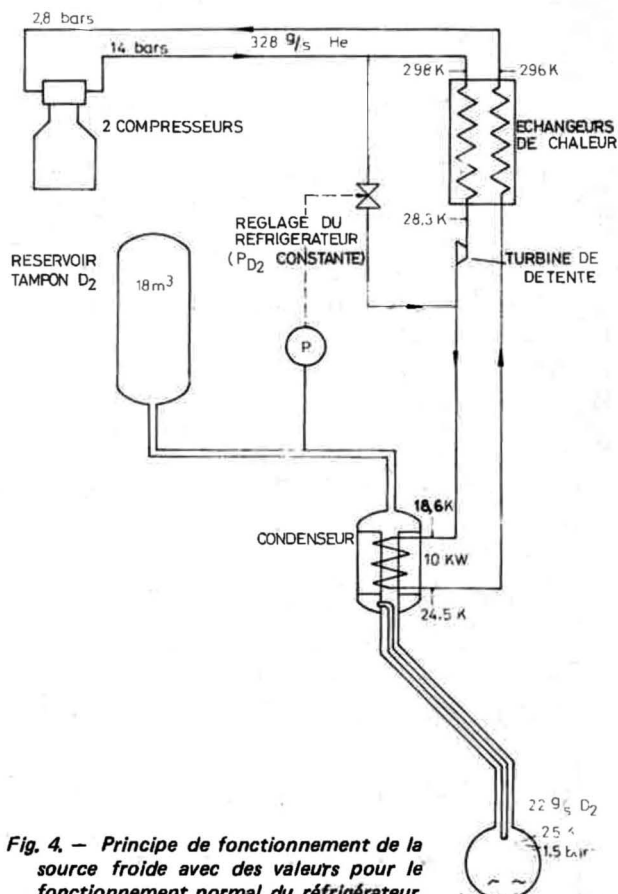


Fig. 4. - Principe de fonctionnement de la source froide avec des valeurs pour le fonctionnement normal du réfrigérateur.

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).

La source chaude du réacteur à haut flux

Par G. BOHME*, W. DREXEL** et F. WUNDERLICH*

Résumé :

Pour obtenir un gain sur le flux de neutrons chauds (0,15 à 1eV) pour 4 canaux du RHF, une "source chaude" est installée dans le réflecteur d'eau lourde. La source proprement dite est un bloc de graphite porté à 2 000 °K par le rayonnement nucléaire. Entourée de laine de graphite, la source est isolée de l'eau lourde par une double enceinte. La surveillance des pressions du circuit d'hélium associé assure, avec les précautions constructives, la sûreté de l'installation.

Summary :

To achieve a gain on the hot neutron flux (0,15 to 1eV) for 4 HFR channels, a "hot source" is set up in the heavy water reflector. The source itself is a block of graphite heated to 2 000 °K by nuclear radiation. Surrounded by graphite wool, it is insulated from the heavy water by a double enclosure. Safety of the unit is maintained by supervision of the helium circuit pressures together with built-in safety measures.

Zusammenfassung

Um den Fluss heisser Neutronen (von 0,15 bis 1 eV) in vier Kanälen des HFR zu erhöhen, wurde eine "heisse Quelle" in den Schwerwasserreflektor eingebaut. Die eigentliche Quelle besteht aus einem Graphitblock, der durch die nukleare Strahlung auf 2000°K erwärmt wird. Er ist mit Graphitfilz umgeben und durch einem doppelten Behälter vom Schwerwasser getrennt. Die Sicherheit der Anlage wird durch die Drucküberwachung des Heliumkreislaufes und durch konstruktive Massnahmen gewährleistet.

I. BUT

Il a été prévu, pour le RHF, un équipement permettant la fabrication de neutrons "chauds" dans le réacteur. Pour cela on a remplacé une partie du modérateur, (D₂O) par un matériau modérateur à haute température (source chaude), dans lequel le flux de neutrons d'une

énergie d'environ 0,15 à environ 1 eV est augmenté. Par 4 canaux dirigés vers la surface du modérateur chaud, les neutrons sont conduits de la source chaude aux expériences qui ont pour but la recherche des propriétés des matériaux condensés.

Etant donné que ce sujet constituera le domaine principal de travail du RHF, la source chaude se trouve

*GFK 75 Karlsruhe, Postfach 3640 - RFA

**Institut Max Von Laue-Paul Langevin

être un des plus importants dispositifs expérimentaux du RHF. Elle a été développée au Centre de Recherche Nucléaire de Karlsruhe, en étroite collaboration avec le groupe de projet du RHF. La réalisation en a été confiée à la Société W.C. HERAEUS-HANAU.

La source chaude proprement dite est un bloc de graphite cylindrique de 20 cm de diamètre et d'environ 30 cm de haut, ayant une température de 2 000 °K. Il se trouve dans le réflecteur d'eau lourde, au-dessus du plan médian du cœur ; son axe est parallèle à l'axe du cœur ; l'écartement entre ces deux axes est de 52 cm. La figure 1 indique les flux neutroniques différentiels attendus approximativement à la surface frontale d'un canal d'irradiation de la source chaude et à celle d'un canal tangentiel normal du RHF, en fonction de l'énergie des neutrons. Dans le domaine d'énergie de 0,3 à 0,4 eV, on constate un gain d'un facteur 15 sur le flux pour les canaux, issus de la source chaude. A ce sujet, en comparaison avec le canal tangentiel normal, le flux de neutrons rapides est plus faible au niveau de l'expérience car les nez des canaux de la source chaude sont éloignés du cœur.

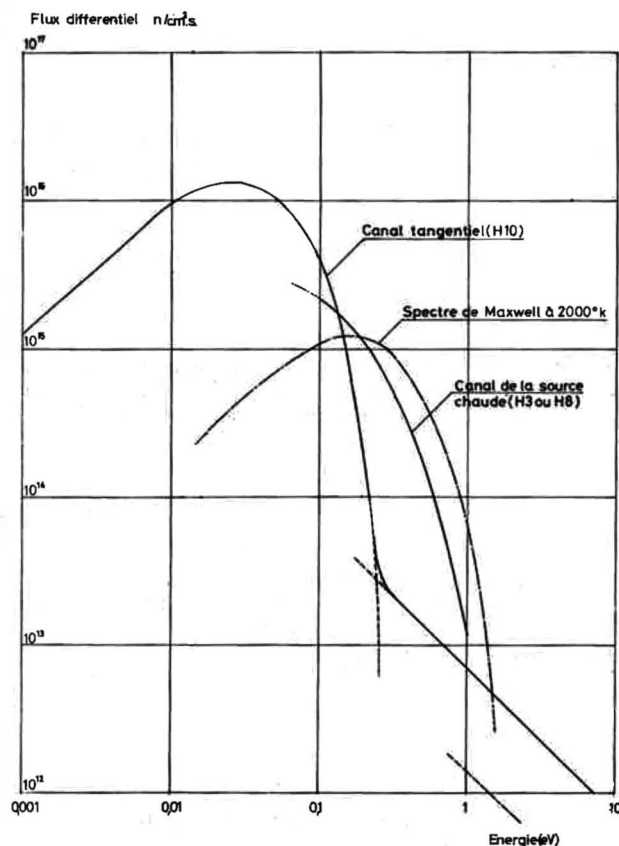


Figure 1 : Flux neutronique différentiel au nez d'un canal issu de la source chaude et d'un canal tangentiel normal du R.H.F.

II. CONCEPTION TECHNIQUE

La conception technique de la source chaude est essentiellement définie par le risque résultant de la présence d'un bloc de graphite chaud (environ 50 MJ d'éner-

gie thermique accumulée) dans le réflecteur d'eau lourde du réacteur.

La figure 2 montre la disposition de la source chaude dans le réacteur. La source est montée verticalement et introduite par le haut dans le réacteur. Les installations d'alimentation, de contrôle et de commande sont disposées dans le ahl du réacteur et reliées à la source par une conduite. La partie inférieure de la source, l'enceinte en zircaloy, se place face à la surface frontale des 4 canaux visant la source chaude. Le jeu entre la paroi extérieure de la source et les nez de canaux est de 5 mm. Le chauffage du bloc de graphite se fait par le rayonnement du réacteur, la puissance de chauffage est d'environ 12 kW.

Comme isolant thermique, on a un feutre de graphite (poids spécifique 0,1 g/cm³), qui permet en même temps d'encasturer solidement le bloc de graphite dans son container (Figure 3). Pour parvenir à une température moyenne de 2 000 °K dans le graphite, il est nécessaire d'avoir une couche de feutre épaisse de 4 cm dans la partie cylindrique. La chaleur est évacuée par le courant d'eau lourde du réflecteur, courant dirigé vers le haut, avec une vitesse de 0,15 m/s.

Le réservoir est exécuté en double paroi pour des raisons de sécurité.

L'intérieur et le jeu entre les parois sont remplis d'hélium. Pour maintenir la température des parois intérieures du réservoir aussi basse que possible, les deux réservoirs cylindriques et fermés par des fonds sphériques (épaisseurs des parois : 2,5 mm chacune) sont encasturés l'un dans l'autre avec le moins de jeu possible. Sur le côté extérieur du réservoir intérieur, est taillé un réseau serré de fines rainures de guidage d'hélium, essentiellement pour pouvoir constater une fuite dans les parois du réservoir par la présence d'hélium.

Le plus grand flux thermique se dégage sur le côté proche du cœur dans la région cylindrique. Il se monte, lors du passage de la paroi à l'eau lourde, à environ 12 W/cm². Etant donné que le jeu maximum permis entre les deux parois du réservoir est fixée à 0,2 mm, il en résulte une limite supérieure de 260 °C pour la température de la paroi intérieure du réservoir.

Dans la partie supérieure de l'ensemble "source chaude", il y a un réservoir de compensation en relation avec l'intérieur du container de la source. Ce système intérieur est entièrement entouré par un système extérieur, auquel appartient le jeu entre les parois du réservoir ainsi que la conduite d'alimentation. Systèmes intérieur et extérieur restent constamment fermés en fonctionnement normal. La pression baisse graduellement du système intérieur au système extérieur vers l'environnement extérieur (pression maximum dans le système intérieur : environ 8,5 bars, pression dans le réflecteur D₂O du réacteur : 3,2 bars).

A côté du contrôle de la pression dans le système intérieur et extérieur, on a prévu un contrôle de température permanent au moyen de thermocouples chromèl-

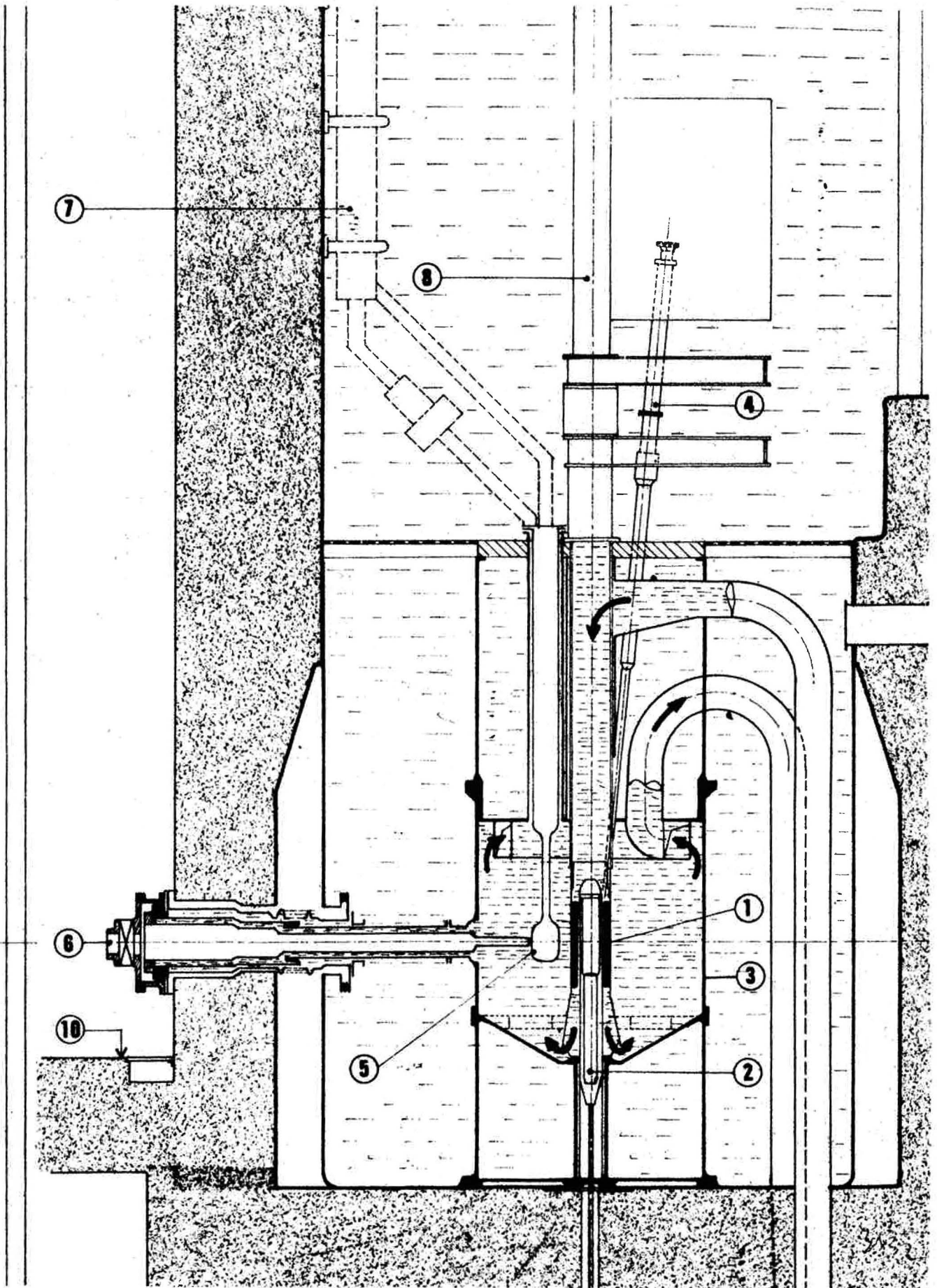


Figure 2 : Situation de la source chaude dans le réacteur

1-coeur du réacteur

6-canal visant la source chaude

5-source chaude

7-tuyauteries de liaison

III. SECURITE

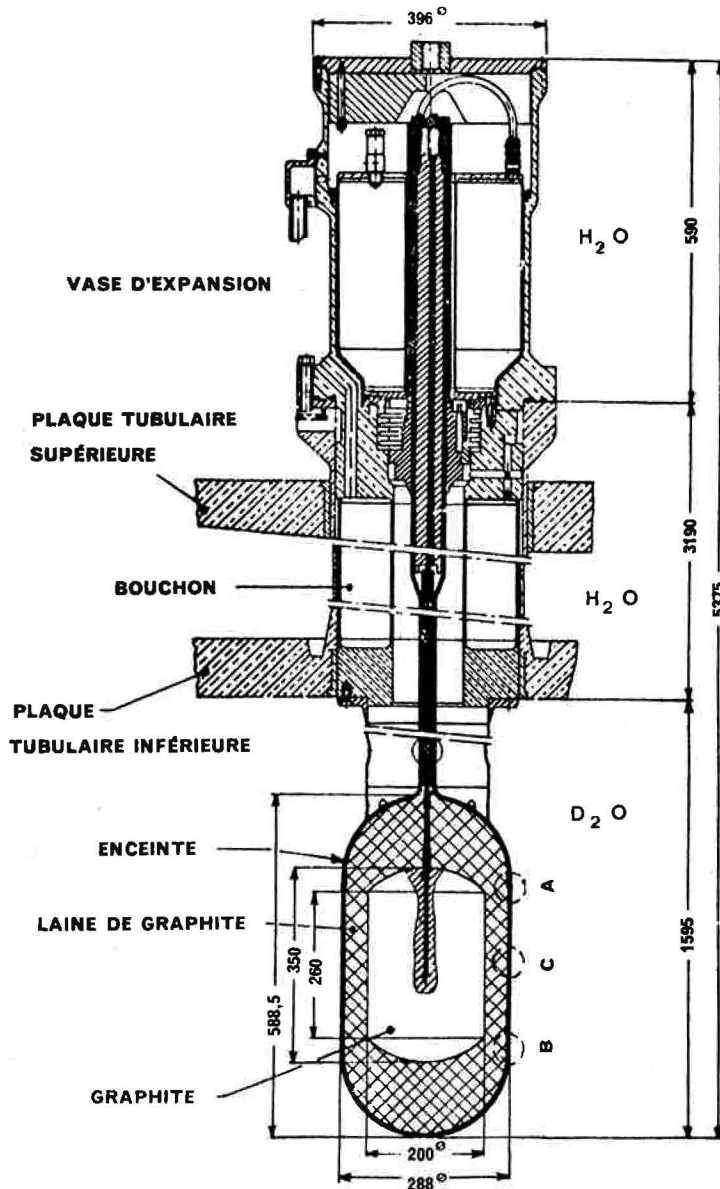


Figure 3 : Coupe verticale de la source chaude.

aludel, à environ 15 emplacements sur la paroi intérieure du container de la source. En outre, on a la possibilité de mesurer la température du graphite de temps en temps au moyen d'un thermocouple pour haute température, interchangeable.

En cas d'incident éventuel, le danger déterminé par la présence du bloc de graphite chaud ne peut être rapidement écarté par la mise hors circuit du réacteur, car le refroidissement du graphite dure plusieurs heures.

Un refroidissement de secours rapide n'est pas prévu, car ce serait techniquement trop complexe à mettre en oeuvre et pourrait créer de nouveaux dangers. Au lieu de cela, l'installation sera faite de telle sorte que les dommages — avant tout les fuites — pourront être détectés le plus tôt possible et que les suites d'un dommage resteront dans des limites tolérées.

En conséquence, on a prévu les dispositifs de sécurité suivants :

- Contrôle permanent et précis de l'espace entre parois par la surveillance de la pression dans le système d'hélium extérieur. Les pressions sont choisies de telle sorte que la montée de pression montre une fuite entre le système intérieur et extérieur, et que la baisse de pression montre une fuite entre le système extérieur et l'environnement extérieur.
- Alimentation en gaz, en cas de fuite, entre le système extérieur et l'environnement extérieur, afin d'éviter la pénétration d'eau lourde ou légère. On fera arriver l'hélium de l'armoire de commande dans le système extérieur.
- Provoquer une égalisation rapide des pressions entre le système intérieur et extérieur en cas de fuite à la paroi intérieure du réservoir, au moyen d'une soupape électromagnétique placée sur le réservoir de compensation. C'est nécessaire, afin d'éviter que les parois du réservoir ne s'échauffent trop au contact du gaz chaud qui passe alors dans le jeu entre les parois.

Afin d'examiner le comportement des matériaux prévus à hautes températures, un essai préliminaire avec simulation des conditions thermiques a été effectué. L'influence du rayonnement (flux de neutrons thermiques : $10^{15}/\text{cm}^2$, flux de neutrons rapides, maximum : $10^{13}/\text{cm}^2$) sera contrôlée par une inspection de la source chaude après quelques mois de fonctionnement du réacteur.

Les dispositifs intégrés destinés à la physique nucléaire

Par J.C. FAUDOU*

Résumé :

Trois équipements sont spécialement destinés à la physique nucléaire. Ils sont conçus pour permettre la mise en place d'un échantillon dans le canal du réacteur en vue d'extraire un faisceau de particules prenant naissance à la suite des captures de neutrons thermiques dans cet échantillon.

On distingue trois équipements suivant la nature du faisceau extrait :

- un faisceau de produits de fission provenant d'une source d'uranium,
- un faisceau de γ de captures provenant d'un isotope,
- un faisceau d'électrons de conversion interne provenant également d'un isotope à étudier.

L'article décrit l'ensemble des problèmes techniques et technologiques qui ont été étudiés au cours de la réalisation de ces dispositifs.

Summary :

Three items of equipment, specially designed for nuclear physics, serve to place a sample in the reactor channel in order to extract a particle beam created as a result of thermal neutron capture in this sample.

The three systems differ according to the nature of the beam required :

- *a fission product beam obtained from a uranium source,*
- *a capture γ beam obtained from an isotope*
- *An internal conversion electron beam also obtained from an isotope to be investigated.*

The technical and technological problems studied during the development of these systems are described.

Zusammenfassung :

Drei Strahlrohre sind speziell für die Kernphysik bestimmt. Diese Strahlrohre sind für den Einbau einer Probe in den Kanal des Reaktors vorgesehen, um ein Teilchenbündel oder Gammastrahlenbündel nach aussen zu führen, welches nach dem Einfang thermischer Neutronen in der Probe entsteht.

Man unterscheidet, je nach der Art des extrahierten Bündels, zwischen den drei folgenden Einrichtungen :

- ein Spaltproduktstrahl aus einer Uranquelle,
- ein Einfang-Gammastrahlenbündel aus einem Isotop
- ein Strahlenbündel von Konversionselektronen aus einem ebenfalls zu untersuchender Isotop.

Diese Arbeit beschreibt die Gesamtheit der technischen und technologischen Probleme die im Laufe der Verwirklichung dieser Einrichtungen untersucht werden.

La plupart des canaux du réacteur à haut flux ont pour but l'extraction d'un faisceau de neutrons en vue de son utilisation à l'extérieur du réacteur. Les canaux destinés à la physique nucléaire, par contre, doivent permettre l'extraction d'un faisceau de rayonnement provenant de la réaction des neutrons avec les noyaux d'un iso-

tope. L'étude de ce rayonnement permet une meilleure connaissance de la structure interne du noyau : c'est le cas de la spectrométrie des gamma de captures ou des béta de conversions internes. Elle permet également l'étude de la réaction qui a donné naissance au rayonnement : c'est le cas de la spectrométrie de produits de fission.

*Institut Max Von Laue-Paul Langevin

I. PROBLEMES COMMUNS AUX DIFFERENTS DISPOSITIFS

Quelle que soit la nature du rayonnement extrait, les dispositifs de physique nucléaire posent un certain nombre de problèmes communs :

1. La réaction qui est à l'origine du rayonnement doit se produire dans une zone où le flux de neutrons thermiques est maximum. Il faut donc introduire dans le doigt de gant, l'isotope, en très faible quantité, dans lequel les neutrons seront capturés. Cela suppose tout un appareillage intégré au réacteur, avec support de source, porte-source et moyens de manutention de ce dernier permettant l'introduction et l'extraction d'une source pendant le fonctionnement du réacteur.
2. L'intensité du faisceau à étudier, proportionnelle au flux thermique doit être maximum, tandis que celle des autres rayonnements, et en particulier du rayonnement γ , qui contribuent au bruit de fond, doit être minimum.

La distance entre la source et le cœur du réacteur correspond à la valeur maximum du rapport :

flux thermique

flux gamma

Par ailleurs, des rayonnements gamma ou bêta sont également émis par le fond ou les parois du doigt de gant. Pour limiter cet effet, on a éloigné le nez du canal de la zone de flux maximum (cas du canal β) où on l'a supprimé en réalisant un canal traversier (cas du canal γ , qui peut donc extraire 2 faisceaux).

Contre l'effet des parois, on utilise des collimateurs qui empêchent de voir, du spectromètre, les parois du canal ou les structures (porte-source et mécanismes divers).

Dans le cas du canal pour spectrométrie de bêta, l'aluminium du doigt de gant a été remplacé par le zircolay, en raison du spectre bêta d'activation beaucoup plus faible de ce dernier, et les bêta parasites résiduels sont absorbés par un chemisage intérieur en graphite.

3. En raison de la grande longueur de vol des faisceaux entre la source et le spectromètre (entre 10 m et 14 m) et du freinage des particules chargées. Il est nécessaire de maintenir les canaux sous un bon vide secondaire (10^{-6} Torr pour les produits de fission, 10^{-4} pour les bêta) ou sous atmosphère rigoureusement contrôlée (hélium à 10^{-1} Torr pour les gamma).
4. La présence des sources et des mécanismes à l'intérieur du doigt de gant entraîne des problèmes d'échanges thermiques pendant le fonctionnement, limités au rayonnement en raison du vide, ou des problèmes d'activation lors des démontages ou des interventions pour dépannage. Quelques chiffres permettent de situer le problème : les sources, donc le nez des porte-

source, sont situés en moyenne à 55 cm de l'axe du cœur (50 pour le canal produits de fission et 78 cm pour le canal bêta) ; l'échauffement nucléaire dû essentiellement aux gamma venant du cœur, et aux gamma et bêta de capture dans les matériaux irradiés eux-mêmes atteint :

2,3 W/g au nez du porte-source du canal pour produits de fission.

0,4 W/g dans le cas du canal β .

Du fait de l'énergie dégagée dans la fission, la source d' ^{235}U du canal pour produits de fission dégage 6 W/cm². Le courant de neutrons thermiques qui, sur l'axe du canal, à 3 m de l'axe du cœur, sort au nez des blocs mécaniques démontables, est encore de l'ordre de 3.10^{11} n/cm²s, alors que l'activation de l'acier inoxydable contenant 4 000 ppm de Co, est importante du point de vue protection à partir de 10^6 n/cm²s et celle de l'aluminium à partir de 10^9 n/cm²s.

5. Les dimensions et l'orientation de la source sont ajustables depuis l'extérieur du réacteur, dans les conditions normales de travail. Ceci suppose, divers mécanismes devant travailler sous flux, sous vide et en température donc sans aucune lubrification.
6. Dans le cas du canal bêta, enfin, la déviation des électrons par le champ magnétique terrestre, compte tenu de leur grande longueur de vol, est telle que seuls les électrons d'énergie supérieure à 100 keV atteignent le spectromètre. Pour améliorer les qualités du dispositif en le rendant apte à mesurer les bêta jusqu'à des énergies de 30 keV, il a fallu blinder tout le parcours des électrons avec du Mumétal.

II. DESCRIPTION DES DISPOSITIFS

A. Canal "Produits de fission" (Figures 1, 2 et 3).

1. C'est une poutre tubulaire légère, réalisée en tôles minces d'acier inoxydable rivées à froid. La longueur est de 3.66 m. La section rectangulaire, choisie de façon à laisser passer le faisceau, varie de 130 x 120 mm au nez à 130 x 190 à l'arrière. La poutre est prolongée à l'arrière par une plaque en acier inoxydable, l'ensemble constituant un chariot de 5,1 m de long.

Ce chariot porte deux rails qui permettent le roulement et le guidage transversal sur des galets solidaires de la partie fixe du canal, et une crémaillère.

En position de travail, le chariot porte-source repose sur le bloc mécanique de longueur 2 670 mm qui est logé dans la partie arrière du doigt de gant.

Le porte à faux du chariot vers l'avant est de l'ordre de 2 000 mm.

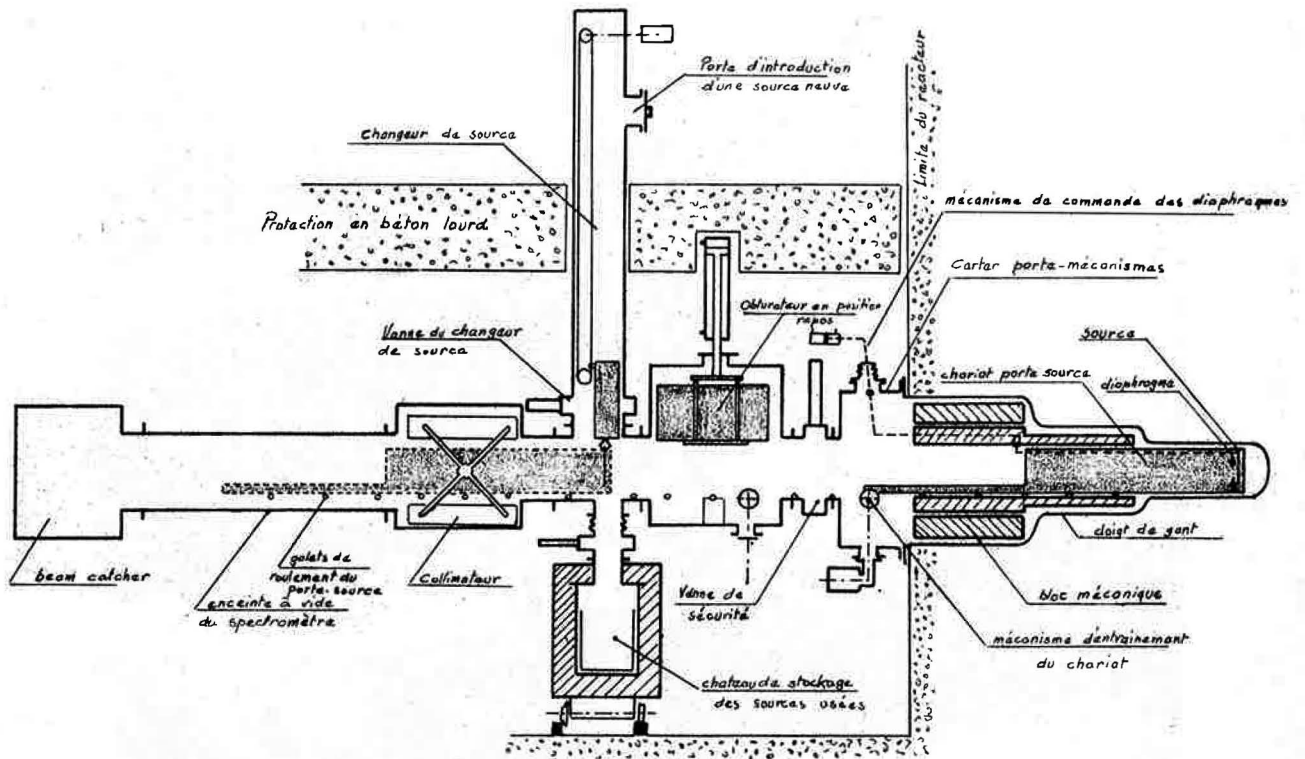


Figure 1 : Equipement pour spectrométrie de produits de fission (échelle non respectée)

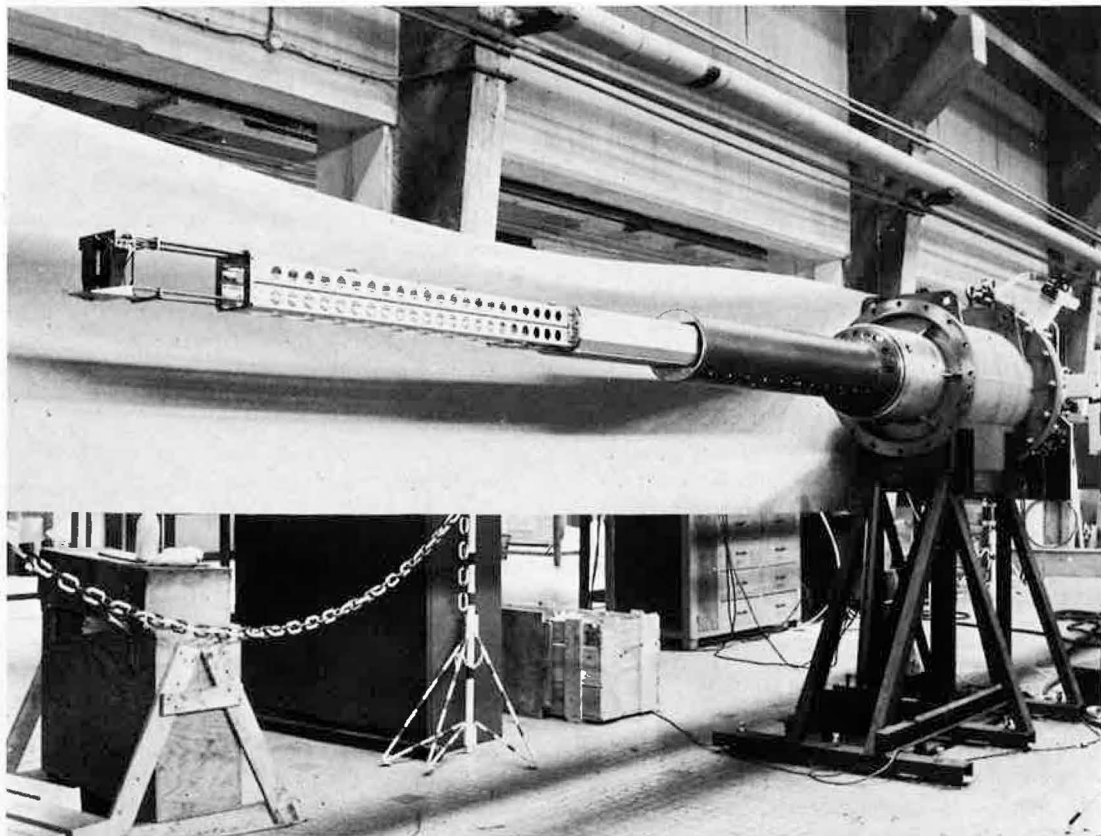


Figure 2 : Partié en pile du canal Produits de fission - Montage en atelier

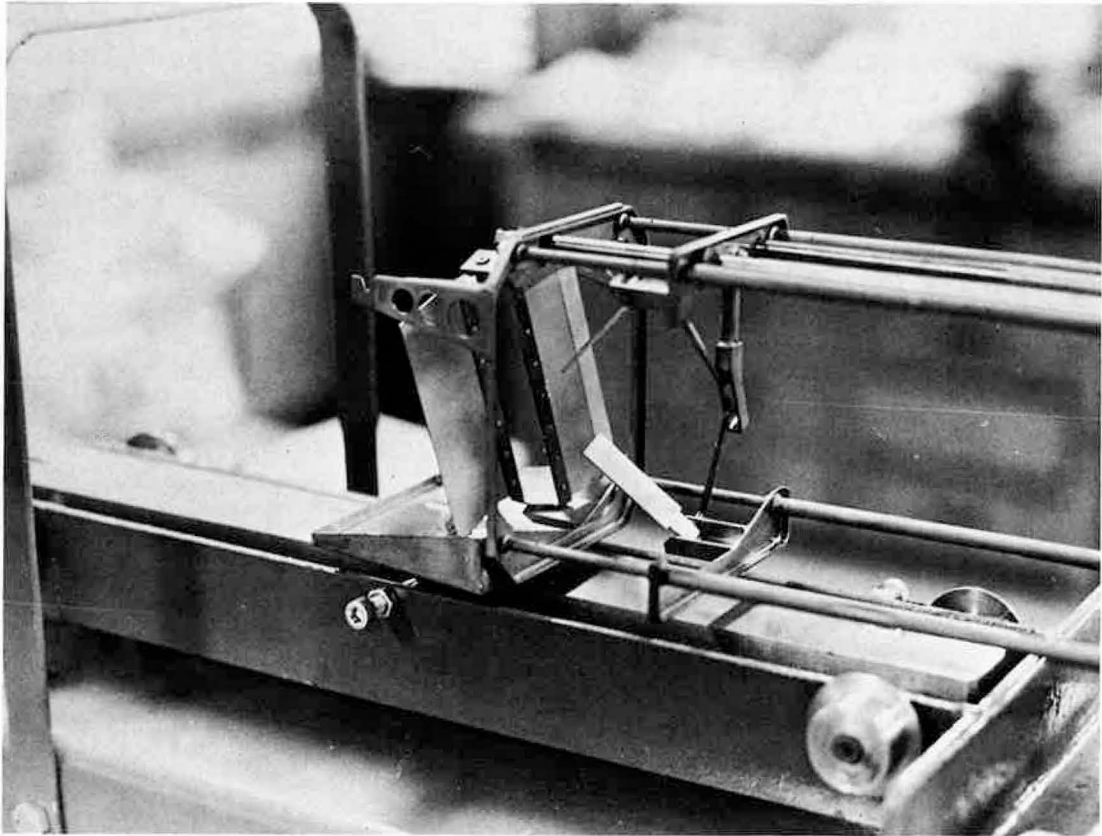


Figure 3 : Canal pour produits de fission - Nez du porte-source

A l'avant du chariot, on trouve la source, constituée d'un dépôt mince ($0,2 \text{ mg/cm}^2$) d' ^{235}U sur une plaque de cuivre de $100 \times 100 \text{ mm}$. La dimension du dépôt est de $90 \times 20 \text{ mm}^2$. La plaque de cuivre a été choisie pour augmenter la surface de rayonnement.

Tout près de la source sont placés deux diaphragmes depuis l'extérieur permettant d'ajuster :

- la hauteur de la partie utile de la source entre 40 et 80 mm à 1 mm près ;
- la largeur entre 0 et 10 mm à $\pm 0,1 \text{ mm}$ dans un sens.

Ces diaphragmes sont commandés à l'aide de 2 tringles d'acier inoxydable, placées sur le dessus du chariot et qui peuvent être mues en translation. Elles reposent sur des paliers secs en molybdène. Pour des raisons qui sont liées au réglage du spectromètre, la position de la source doit pouvoir être ajustée dans un plan perpendiculaire à l'axe du faisceau, par rotation de $\pm 3^\circ$ autour de cet axe avec une précision de $20'$ d'angle.

Ce réglage est obtenu en faisant tourner tout le chariot, par rotation d'une partie du bloc mécanique.

2. Le bloc mécanique

Il est constitué de 2 parties concentriques. La partie extérieure, massive, remplie d'une protection de béton lourd de densité 6,5 pour reconstituer dans le doigt de gant la protection du réacteur, est introduite dans le

canal par roulement sur des galets comme les bouchons standards. La partie intérieure, qui supporte le chariot porte-source, peut tourner dans la partie extérieure.

3. Les mécanismes de commande

Ces mécanismes, constitués suivant les cas par des groupes motoréducteurs ou par des vérins, sont disposés à la périphérie d'un carter en acier qui vient fermer le doigt de gant. Ce carter porte, dans l'axe du faisceau, une ouverture de grande dimension qui peut être obturée à l'aide d'une vanne du type guillotine de diamètre 300 mm. La commande de cette vanne de sécurité est liée au fonctionnement du réacteur.

a) Commande de translation

Elle est assurée par des systèmes de pignons entraînant la crémaillère liée au porte-source.

b) Commande des diaphragmes

Des vérins hydrauliques disposés à l'extérieur de l'enceinte à vide entraînent en translation, par l'intermédiaire d'un levier oscillant logé dans un soufflet d'étanchéité, des tiges de commande liées à la partie tournante du bloc mécanique. La liaison levier-tige se fait par l'intermédiaire d'une fourchette étudiée de façon à rendre le réglage des diaphragmes indépendant de la position angulaire du chariot. La liaison entre les tiges, solidaires du bloc mécanique, et les tringles, liées au porte-source,

se fait au moyen de fourchettes escamotables lors du recul du chariot.

c) Il existe également un verrouillage du chariot en position avant qui a un double rôle :

- maintien du chariot pour empêcher un recul intempestif en travers de la vanne de sécurité ;
- butée précise de positionnement.

4. Partie extérieure au réacteur

Dans le prolongement de l'axe du canal, on trouve successivement :

- L'obturateur, enceinte à vide dans laquelle est stocké le bouchon destiné à obturer le faisceau en cas d'intervention sur le dispositif.
- Le changeur de source, qui permet, à l'aide d'une pince manoeuvrable sous vide, d'extraire une source consommée et de la déposer dans un château de stockage, et d'introduire une source neuve depuis le toit de la casemate en béton qui entoure le dispositif.
- Un collimateur réglable permettant de limiter la dimension du faisceau.
- A 8 m de la source, se trouve alors l'aimant du spectromètre qui dévie les produits de fission selon un arc de cercle de rayon 4 m.
- Le "beam catcher" situé dans l'axe du canal, après l'aimant. Il intercepte les neutrons rapides et les gamma. Il est constitué d'une enceinte étanche entourée d'un mur de béton qui atteint 2,5 m d'épaisseur dans l'axe du faisceau.

B) Canal traversier pour spectromètre gamma

Le principe est le même que celui du canal décrit précédemment ; il en diffère cependant par :

- La section du faisceau, beaucoup plus faible, de l'ordre de $50 \times 15 \text{ mm}^2$, limitée par des rondelles de plomb empilées pour constituer des collimateurs de l'ordre de 2 m de longueur.
- Le passage libre circulaire de diamètre 120 mm, dans lequel circule un collimateur muni de billes porteuses permettant le déplacement longitudinal et une rotation de $\pm 10^\circ$ autour de l'axe du canal. Le porte-source est un tube de section circulaire en tôle de zircaloy. Long de 2 m, il est fixé en porte à faux au nez

* Les équipements du canal pour produits de fission et du canal bêta vertical ont été étudiés et réalisés par les Ateliers de Prototypes et des Techniques Avancées du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble.

du collimateur mobile. La source est un sandwich très mince de l'isotope à étudier entre 2 feuilles d'aluminium. Il est suspendu au bout du porte-source, de sorte que, du spectromètre, on n'en voit que la tranche. Pour corriger un mauvais positionnement, la source repose sur le porte-source par l'intermédiaire d'un support pivotant autour d'un axe vertical. La commande de ce mouvement se fait depuis l'extérieur, par translation d'une tringle, comme précédemment.

- Le vide moins poussé qui permet d'adopter pour les traversées étanches des solutions plus classiques.

C) Canal bêta vertical (Figures 4)

L'ensemble du dispositif est construit autour de 2 axes principaux. L'un vertical est destiné à permettre à l'aide d'un treuil la mise en place et le retrait de la source.

L'autre, incliné de 7° par rapport à la verticale, permet la sortie du faisceau d'électrons de conversion vers le spectromètre disposé sur la margelle de la piscine.

On peut discerner 3 parties essentielles : la partie basse en contact avec l'eau lourde, la partie intermédiaire dans la piscine et la partie supérieure sur une passerelle en forme de plongeur.

1. La partie basse (Figure 5) ***

En forme de Y, elle est réalisée en zircaloy et mesure 7 m de long. Sa construction a fait appel à des tôles roulées, d'épaisseur comprise entre 5 et 10 mm et à des brides usinées, entièrement soudées sous argon. La branche inférieure du Y, qui mesure 1750 mm entre le plan de la source et le fond du canal, a été usinée intérieurement puis gainée de graphite. Le tube de zircaloy a été chauffé pour permettre l'introduction sans jeu des viroles en graphite. Le fretage ainsi obtenu assure un bon contact thermique entre graphite et zircaloy. La partie basse repose par l'intermédiaire d'une bride d'aluminium sur la structure supérieure du bloc pile, à 4500 mm au dessus du plan médian du cœur.

2. La partie intermédiaire

Elle comporte un double obturateur commandé mécaniquement depuis le dessus de la piscine. Cet obturateur a surtout pour but de permettre, lorsque le réacteur est arrêté, l'accès sur la structure supérieure des équipes d'exploitation. On trouve ensuite 2 tubes en aluminium de 200 mm de diamètre environ et de 8 m de long. Le tube vertical contient 2 rails de guidage du porte-source. Le tube incliné est entièrement doublé à l'intérieur avec une chemise en Mumétal. Un troisième

** L'équipement du canal traversier pour spectrométrie gamma a été étudié et réalisé par la Division Neyrpic (Département des Applications Nucléaires) de la Société Alstom.

*** La partie basse en Zircaloy a été réalisée par les établissements TREFIMETAUX d'Argenteuil.

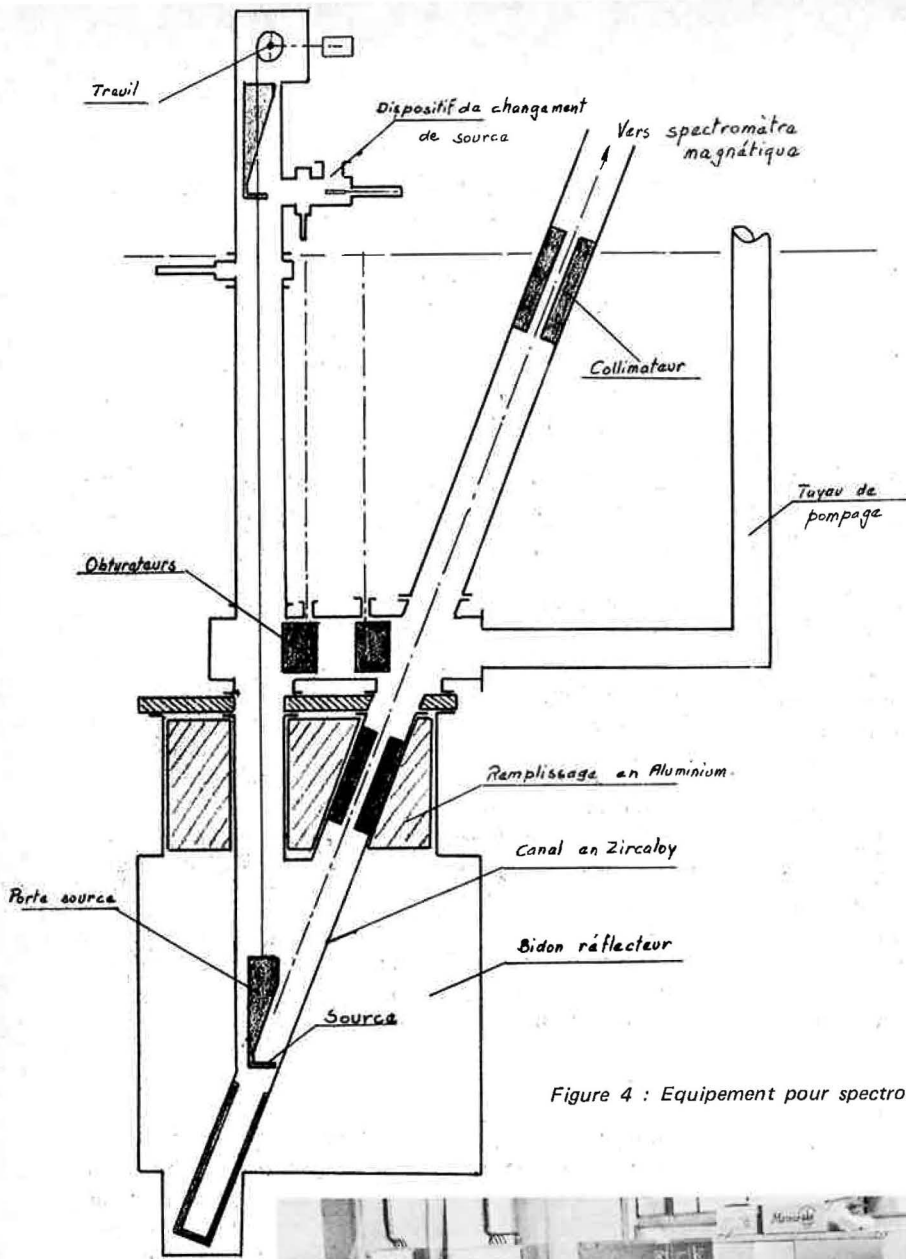


Figure 4 : Equipement pour spectrométrie Bêta

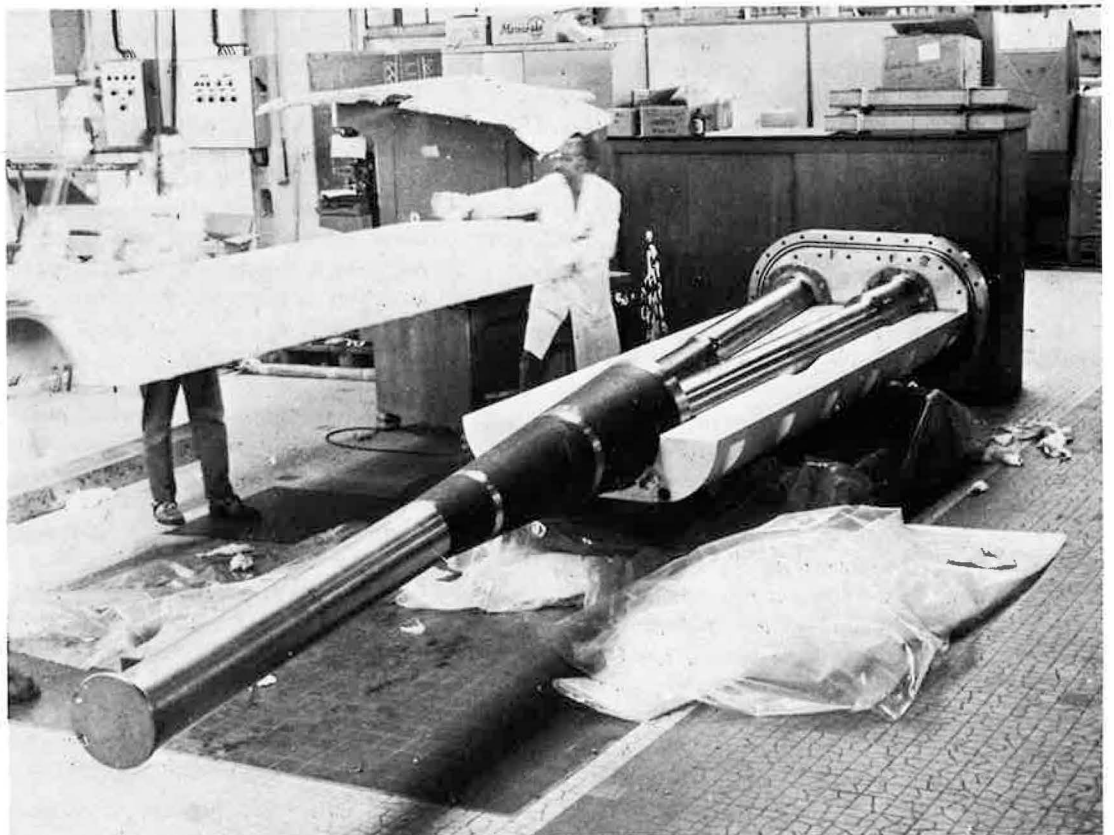


Figure 5 :
Partie basse
du canal
Bêta
Habillage
en atelier

tube de 350 mm de diamètre assure la liaison entre la partie basse et le groupe de pompage de 1200 l/s placé près du spectromètre.

3. La partie supérieure

Le tube vertical est coiffé d'un château de plomb dont l'épaisseur, variant entre 10 et 15 cm, permet la remontée du porte-source et de son câble de soutien sans refroidissement préalable. Le porte-source mesure 800 mm

de long et pèse 2,8 kg. Il est usiné dans du graphite nucléaire, dont le taux en sodium est inférieur à 0,5 ppm.

L'extrémité supérieure du château porte le treuil mu par un groupe motoréducteur et étudié pour détecter rapidement un frottement anormal du porte-source ou un coincement du câble. Sur le côté du château, en face d'un hublot, un dispositif à axe horizontal permet l'échange de la source, réacteur en fonctionnement et sous vide.

Les conduits de neutrons

Par P. AGERON et P.A. BLUM

Résumé :

Dix conduits de neutrons sont installés. Ils sont complétés par des conduits spéciaux qui répartissent les faisceaux entre les expérimentateurs. Ils desservent ainsi 40 % des possibilités expérimentales du Réacteur à Haut Flux.

Après un rapide rappel des principes, l'accent est mis sur les tolérances de fabrication à imposer pour la rugosité microscopique, les défauts angulaires macroscopiques (réglage angulaire et planéité des éléments) et les défauts de choc.

Les dispositions constructives sont conditionnées par le trajet des conduits qui partent du bloc pile, traversent d'abord une piscine, ensuite une casemate en béton pour ressortir soit dans le hall "Expérimentateurs" du réacteur, soit dans un bâtiment annexe.

Summary :

Ten neutron ducts are installed and served by special ducts which distribute the beams amongst the experimentalists, thus supplying 40 % of the experimental possibilities of the high flux reactor.

After a brief outline of the principles, stress is laid on the manufacturing tolerances to be laid down for the microscopic roughness, macroscopic angular defects (angular adjustment and flatness of elements) and shock defects.

The building arrangements are governed by the path of the ducts which leave the pile building, pass through a swimming pool and then a concrete cell and emerge either in the "experimentation" hall of the reactor or in an adjoining building.

Zusammenfassung :

10 Neutronenleiter sind installiert. Sie sind durch Spezialleiter vervollständigt, die die Strahlen zwischen den Experimentatoren aufteilt. Sie dienen ebenso 40 % der Experimentiermöglichkeiten des Hochflussreaktors.

Nach einem schnellen Wiederholen der Prinzipien wird der Akzent auf die Fabrikationstoleranzen gesetzt um die mikroskopische Rauheit, die makroskopischen winkligen Fehler (Winkelmessung und Elementebenheit) und die Abweichungen an den Stößen zu verlangen.

Die konstruktiven Möglichkeiten sind durch den Leiterweg bedingt die vom Reaktor ausgehen, überqueren zuerst ein Becken, dann eine Betonkasemate, um entweder in der Experimentierhalle des Reaktors, oder im Nebengebäude wieder herauszukommen.

Le principe des conduits à réflexion totale de neutrons a été maintes fois décrit [1], [2], [3] [4]. Il y a réflexion totale, par exemple à l'interface du vide et d'un milieu d'indice de réfraction $n < 1$, lorsque l'angle d'incidence γ est inférieur à l'angle critique γ_c où $\cos \gamma_c = n$

avec $n = \sqrt{1 - \lambda^2 \frac{Na}{\pi}}$ pour des neutrons de lon-

gueur d'onde λ et un milieu ayant une densité N d'atomes d'amplitude de diffusion cohérente a . C'est essentiellement un phénomène de surface puisque la longueur de

relaxation de l'onde évanescente

$$d = \frac{1}{\sqrt{4\pi Na}} \times \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \gamma}{\sin^2 \gamma_c}}}$$

est, par exemple pour le nickel, de l'ordre de 100 Å (pour $\gamma \ll \gamma_c$), de sorte que la transmission est négligeable pour des épaisseurs de 1 000 à 2 000 Å.

Les conduits de neutrons sont généralement des tubes de section rectangulaire, de largeur a et de hauteur b. Pour les conduits droits, les neutrons sont transmis dans un angle solide $4\gamma_c^2$ constant en tout point de la section, avec un nombre moyen de réflexions :

$$\bar{m} = \frac{L\gamma_c}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (L \text{ étant la longueur du conduit})$$

Le plus souvent, les conduits sont courbes, de façon à supprimer toute transmission en vue directe des rayonnements parasites, neutrons rapides et gammas. La longueur minimale de vue directe est $L_1 = \sqrt{8aR}$ (R rayon de courbure du conduit). L'angle solide dans lequel sont transmis les neutrons n'est plus constant dans la section du guide mais varie en fonction de la distance x au bord extérieur du guide, et a pour valeur :

$$4\gamma_c^2 \sqrt{1 - \frac{x}{a} \frac{\gamma_*^2}{\gamma_c^2}}$$

où $\gamma_* = \sqrt{\frac{2a}{R}}$ est l'angle caractéristique du conduit

De même, le nombre n de réflexions dépend de x et vaut :

pour $\gamma \leq \gamma_c - \frac{x}{a} \gamma_*$ réflexion en guirlande

$$m = \frac{1}{\sqrt{(\gamma/\gamma_*)^2 + x/a}}$$

$\gamma \geq \gamma_c - \frac{x}{a} \gamma_*$ réflexion en zig-zag

$$m = \frac{2}{\sqrt{(\gamma/\gamma_*)^2 + \frac{x}{a}} - \sqrt{(\gamma/\gamma_*)^2 + \frac{x}{a} - 1}}$$

I. TOLERANCES DE FABRICATION

La transmission dans les limites d'angle solides mentionnées plus haut, n'est égale à un que pour des conduits parfaits. Dans les conduits réels, il se produit des manques de réflexion qui entraînent des pertes de neutrons (par diffusion et absorption) et qui sont dues à des défauts de différents types :

A. Rugosité microscopique

La rugosité de la surface réfléchissante, à l'échelle microscopique (c'est-à-dire de dimension comparable à la profondeur de pénétration), provoque autour de la réflexion franche, une réflexion diffuse pour laquelle l'angle après réflexion peut être supérieur à l'angle critique, ce qui entraîne une perte à la réflexion suivante. La part réfléchie de façon diffuse est proportionnelle [5] à :

$$\gamma \sqrt{\frac{\omega}{\lambda}} < \frac{\xi^2}{d^2}$$

$\langle \xi^2 \rangle$ et ω étant respectivement la moyenne quadratique et la longueur de corrélation de la rugosité supposée répartie au hasard. Cette relation montre que la perte est admissible pour des valeurs de ω et de $\langle \xi^2 \rangle^{1/2}$ pas trop grandes par rapport respectivement à la longueur d'onde et à la profondeur de pénétration. Toutefois cette relation s'applique mal pour les grandes valeurs de ω et de $\langle \xi^2 \rangle^{1/2}$ et par ailleurs ces paramètres sont difficilement mesurables. On préfère se fier à l'expérience des conduits existants qui a montré que la réflectivité est suffisante (environ 97% à 99%) pour des surfaces polies de qualité miroir. Cette qualité étant obtenue couramment par polissage de plaques de verre, c'est ce matériau qui est le plus souvent utilisé comme support de la couche mince réfléchissante ; par exemple 2 000 Å de nickel déposé par évaporation sous vide.

L'influence de ce défaut sur la transmission est proportionnelle au nombre moyen de réflexions, donc à la longueur d'onde des neutrons et à la longueur du conduit.

B. Défauts angulaires macroscopiques

Les conduits sont faits de plaques planes assemblées de façon à constituer un tube courbe. Les ondulations ou le voilage des plaques, l'imprécision de leur réglage angulaire, l'approximation polygonale de la courbure font que les neutrons ayant un angle d'incidence voisin de l'angle critique peuvent se présenter à la réflexion suivante avec un angle d'incidence supérieur à l'angle critique et ne pas être réfléchis. Si on désigne par a_1 , a_2 et a_3 les écarts angulaires maximaux des surfaces par rapport à leur position idéale, dus respectivement aux ondulations, à l'imprécision de réglage et à l'approximation polygonale, la perte est proportionnelle à :

$$\frac{1}{\gamma_c} \sqrt{n_{\max} (a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)}$$

(n_{\max} nombre de réflexions pour γ voisin de γ_c).
dû au fait que les écarts sont distribués au hasard entre les valeurs maximales $\pm a_i$.

L'incertitude de réglage a_2 , par autocollimation peut être facilement inférieure à $0,5 \cdot 10^{-4}$ radian. L'approximation polygonale est $a_3 = \frac{l}{2R}$ (l : longueur droite élémentaire). On choisit $l = 1$ m, ce qui donne $a_3 < 0,5 \cdot 10^{-4}$

pour les conduits de neutrons thermiques ($R > 10000$ m) et $< 2 \cdot 10^{-4}$ pour les conduits de neutrons froids ($R > 2500$ m) sauf pour les conduits très courbes où $l = 25$ cm. C'est une bonne planéité des plaques qui est la plus difficile à réaliser. On a pu obtenir $\alpha_1 \leq 10^{-4}$ pour les conduits thermiques et $\alpha_1 \leq 3 \cdot 10^{-4}$ pour les conduits froids.

C. Défaut de choc

Les variations d_a et d_b , respectivement en largeur et en hauteur, des dimensions intérieures des différents tronçons et de leur positionnement entraînent une perte proportionnelle à $\frac{d_a}{a} + \frac{d_b}{b}$

En assortissant les tronçons après fabrication, on peut obtenir $d_a < 10^{-2}$ mm et $d_b < 10^{-1}$ mm.

Les interruptions longitudinales entre tronçons entraînent des pertes beaucoup plus faibles et il est possible de tolérer des chanfreins de 0,5 mm et, tous les 10 m, des espaces de dilatation de 3 mm.

II. REALISATION DES CONDUITS

A. Disposition générale

L'installation se compose de 10 conduits qui desservent en neutrons 40 % des possibilités expérimentales du réacteur à haut flux. Deux d'entre eux aboutissent à des dispositifs situés dans le hall du réacteur et les huit autres sont utilisés dans un bâtiment annexe de 90 m de longueur sur 35 m de largeur. Cinq conduits forment la nappe H1 et visent la source froide. La nappe H2, formée par les cinq autres conduits, vise le réflecteur d'eau lourde.

La longueur totale installée à poste fixe est de 473 mètres. Il convient d'y ajouter 120 mètres de conduits spéciaux qui répartissent à la sortie des conduits principaux les faisceaux de neutrons entre les différentes expériences.

Les conduits principaux sont courbés et leurs rayons vont de 25 m à 27 000 m (leurs caractéristiques sont réunies dans le tableau I du premier article de ce numéro.) L'obtention d'une longueur de vue directe à la paroi du hall du réacteur correspond à un rayon de courbure de 2 700 m.

B. Les conduits principaux

Les conduits principaux traversent plusieurs zones. Aussi distingue-t-on la partie en pile, la partie en piscine, la partie en casemate dans le hall pile, la partie en casemate dans le bâtiment annexe.

Un conduit est formé de tubes de verre de section intérieure rectangulaire de 30 mm de largeur et de 200 mm de hauteur. La longueur standard de l'élément de tube est de 1 mètre pour la plus grande partie de l'ensemble. Les faces internes du tube sont polies de manière à obtenir une rugosité arithmétique moyenne de 300 Angströms. Ces faces reçoivent ensuite un revêtement de nickel d'environ 2 000 Angströms d'épaisseur. Le verre est du verre boré (13% de B_2O_3) fourni par SOVIREL pour la partie en pile et par SCHOTT pour le reste de la fourniture.

1. Partie en pile

Dans la partie en pile (Figure 1) seule la nappe H1 est constituée de conduits de neutrons. La nappe H2 est constituée de collimateurs formés de plaques de verre PYREX non polies. Cette partie en pile, enfermée dans un carter unique, étanche au vide, vient s'insérer dans des cavités qui permettent l'approche maximum des sources de neutrons. Sur l'avant des cavités sont disposés deux obturateurs liquides que l'on peut remplir d'eau déminéralisée. Sur l'arrière de la partie en pile des obturateurs de plomb viennent compléter l'obturation des faisceaux, ce qui permettra le travail éventuel sur les conduits en casemate pendant la marche du réacteur. La partie en pile a été réalisée par NEYRPIC/ALSTHOM et JOBIN-YVON - JOUAN-QUETIN.

2. Partie hors pile

La partie en pile débouche dans une piscine dont le but est d'une part de compléter la protection propre du réacteur et d'autre part d'atténuer le rayonnement dû à l'absorption des neutrons dans le verre boré. Les conduits de neutrons qui sont dans la piscine et ceux qui leur succèdent en casemate sont construits suivant le même principe, principe d'ailleurs déjà mis en œuvre au réacteur FRM de GARCHING, près de MUNICH. Chaque conduit se trouve dans un tube d'acier qui lui sert à la fois de carter d'étanchéité au vide (et à l'eau pour la partie en piscine) et de poutre support. Chaque tube d'acier mesure en général 10 mètres. Les tubes sont munis de traversées diverses pour les réglages et les visées (Figure 2).

Le positionnement en hauteur et l'horizontalité se font par l'extérieur au moyen de vis de longueur constante. Des languettes assurent l'emboîtement des éléments successifs dont la verticalité et l'orientation angulaire est assurée au moyen de 2 vis, par autocollimation.

A la sortie de la piscine, chaque conduit est muni d'une vanne de sécurité étanche à l'eau. A la traversée de l'enceinte du bâtiment du réacteur, chaque conduit reçoit une vanne étanche à l'air pour maintenir le principe du confinement. Il est en outre prévu de garnir d'un absorbant les opercules de ces dernières vannes pour leur faire jouer le rôle d'obturateur de faisceaux. Depuis la partie en pile, les conduits sont construits par la firme M.A.N. d'Augsburg, la partie "optique" étant réalisée par JOBIN-YVON JOUAN-QUETIN.

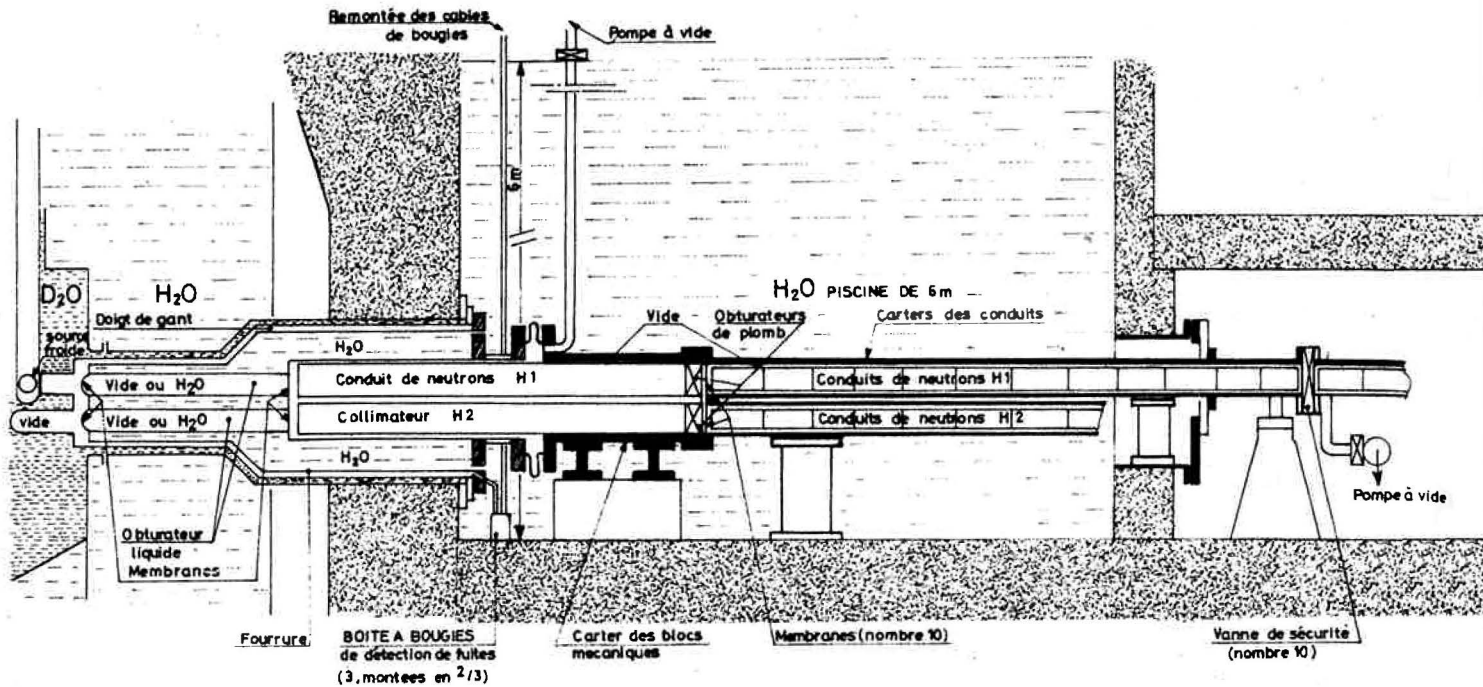


Figure 1 : Conduits de neutrons : partie en pile et en piscine

C. Les conduits spéciaux

La raison du choix d'une hauteur de 200 mm pour les conduits de neutrons principaux est de pouvoir fournir aux physiciens utilisateurs trois faisceaux de neutrons superposés, de manière à alimenter au moins trois expériences par conduit. Les conduits spéciaux répartissent donc ces faisceaux. Leur réalisation a été confiée à la Société SRPI-MORIN. Le maximum de souplesse a été recherché : les conduits spéciaux sont formés de tronçons standard rectilignes de 5 mètres, avec soit une section de 30 x 125 mm, soit une section de 30 x 50 mm. Le conduit n'est plus en carter mais tient son vide lui-même, suivant la technique mise en oeuvre au réacteur EL3 de SACLAY'

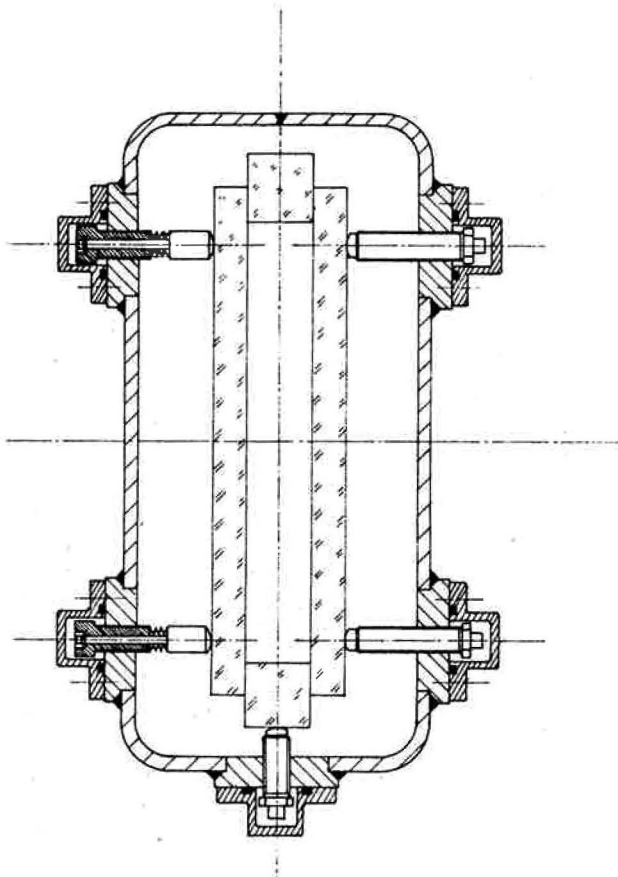


Figure 2 : Conduits de neutrons : section courante

D. Protection des conduits

Les neutrons non réfléchis sont absorbés par le bore qui émet un gamma de capture de 0,5 MeV, de telle sorte que, même au-delà de la vue directe, il faut entourer les conduits d'une protection biologique.

A proximité du réacteur, cette protection est assurée par une piscine d'eau déminéralisée. Ensuite les conduits principaux circulent dans une casemate qui les englobe tous. Cette casemate est formée de blocs et de dalles amovibles, en béton, soit du béton ordinaire, soit du béton hydrogéné (béton à la serpentine) de densité 2,2, du côté des conduits froids.

A leur extrémité, les conduits principaux sortent de la casemate pour alimenter les conduits spéciaux. Chaque conduit spécial reçoit sa propre protection individuelle sous forme d'une poutre en béton qui vient le coiffer.

Comme les autres protections amovibles des dispositifs expérimentaux, les protections des conduits de neutrons ont été fabriqués et posés par l'Entreprise REYDEL et ses Fils, de VOIRON.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] H. MAIER-LEIBNITZ, T. SPRINGER—“The use of neutron optical devices on beam hole experiments” *J. of Nuclear Energy* V. 17 No 15 July 1963.
- [2] B. FARNOUX, B. HENNION, J. FAGOT—Description et caractéristiques neutroniques du tube conducteur de neutrons installé près du réacteur EL3. Neutron Inelastic Scattering IAEA Vienna 1968.
- [3] B. JACROT— Utilisation of neutron guide tubes for neutron inelastic scattering, Instrumentation for neutron inelastic scattering research IAEA Vienna 1970.
- [4] C. BOUTON — Etude et réalisation de conduits de neutrons (Thèse).
- [5] A. STEYERL—“Transmissionmessungen mit ultrakalten Neutronen” Thèse à l'Université de Munich fev. 71.

Les spectromètres de physique du solide

Par G. GOBERT*

Résumé :

Les spectromètres actuellement prévus autour du réacteur sont étudiés selon des technologies classiques et par un découpage des ensembles mécaniques correspondant aux fonctions désirées ; les combinaisons et permutations possibles des équipements procurent à ces appareils une grande souplesse d'exploitation dont quelques cas caractéristiques sont ici présentés.

Summary :

The spectrometers at present foreseen around the reactor are designed according to standard technologies and by the choice of a combination of mechanical features corresponding to the desired functions. The possible combinations and permutations of equipment give these instruments a great versatility of use, some typical cases of which are given here.

Zusammenfassung :

Die zur Zeit um den Reaktor geplanten Spektrometer werden nach den konventionellen Technologien und durch eine Zerlegung der den gewünschten Funktionen entsprechenden mechanischen Einheiten untersucht. Die Zusammensetzung und Umsetzungsmöglichkeiten der Einrichtungen vermitteln diesen Apparaten eine grosse Anpassungsfähigkeit in der Ausnutzung, wovon manche charakteristische Fälle in dieser Arbeit erwähnt werden.

L'appareillage adapté aux diverses expériences prévues autour du réacteur comprend des spectromètres où les fonctions de : monochromateur, échantillon, analyseur et détecteur correspondent

- soit à des réalisations indépendantes spécialisées pouvant être couplées mécaniquement entre elles,
- soit à des ensembles complexes où les fonctions sont associées de façon rigide.

Chacune de ces fonctions nécessite des mouvements circulaires, combinés parfois à des mouvements linéaires.

Parmi les appareils en cours de montage, certains sont dans leur ensemble réalisés par les centres de recherches

et l'industrie allemande, d'autres, étudiés par l'Institut, font l'objet de contrats de réalisation en Allemagne et en France.

I. SPECTROMETRES A FONCTIONS INDEPENDANTES

On distingue deux types d'appareils suivant que l'on veut obtenir une longueur d'onde fixe ou variable. Ils se différencient le plus fréquemment en fonction de la position de l'échantillon par rapport au monochromateur. Dans le premier cas, cette position est fixe, dans le second cas elle est :

- soit mobile en rotation autour du monochromateur,
- soit fixe et le monochromateur est alors animé d'un mouvement de translation.

*Institut Max Von Laue-Paul Langevin

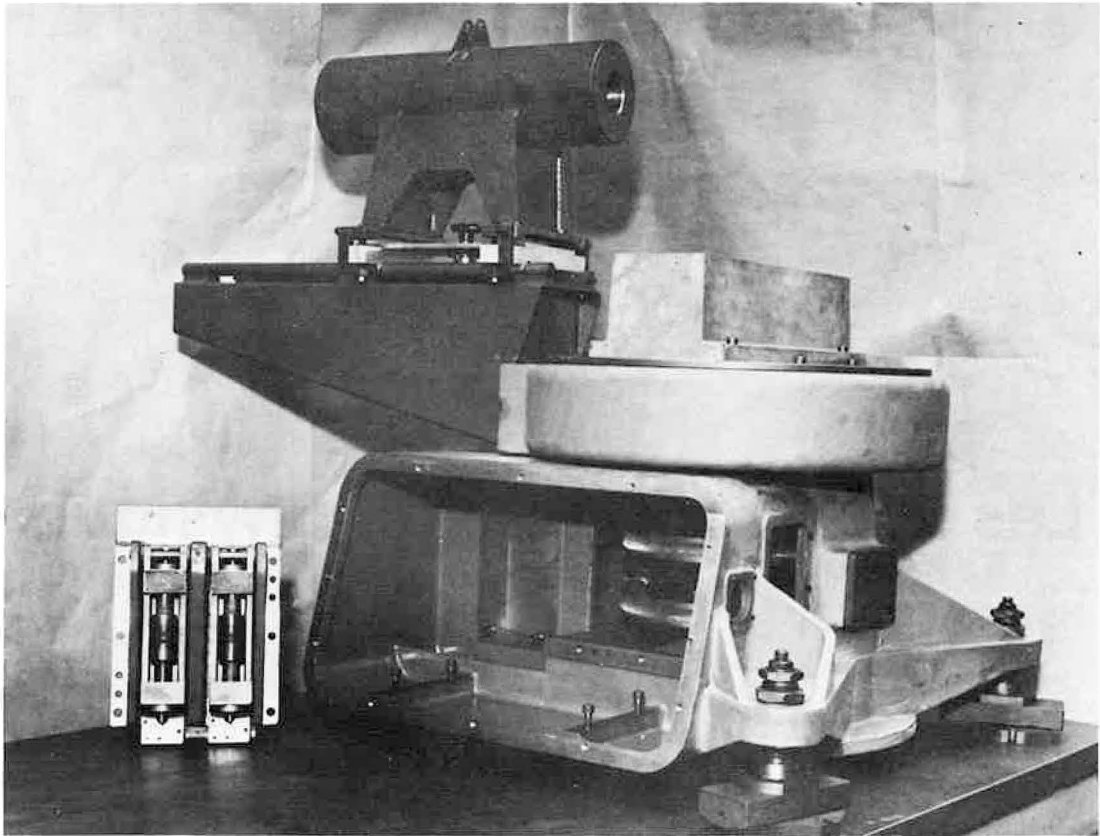


Figure 1 : Spectromètre à double mouvement concentrique

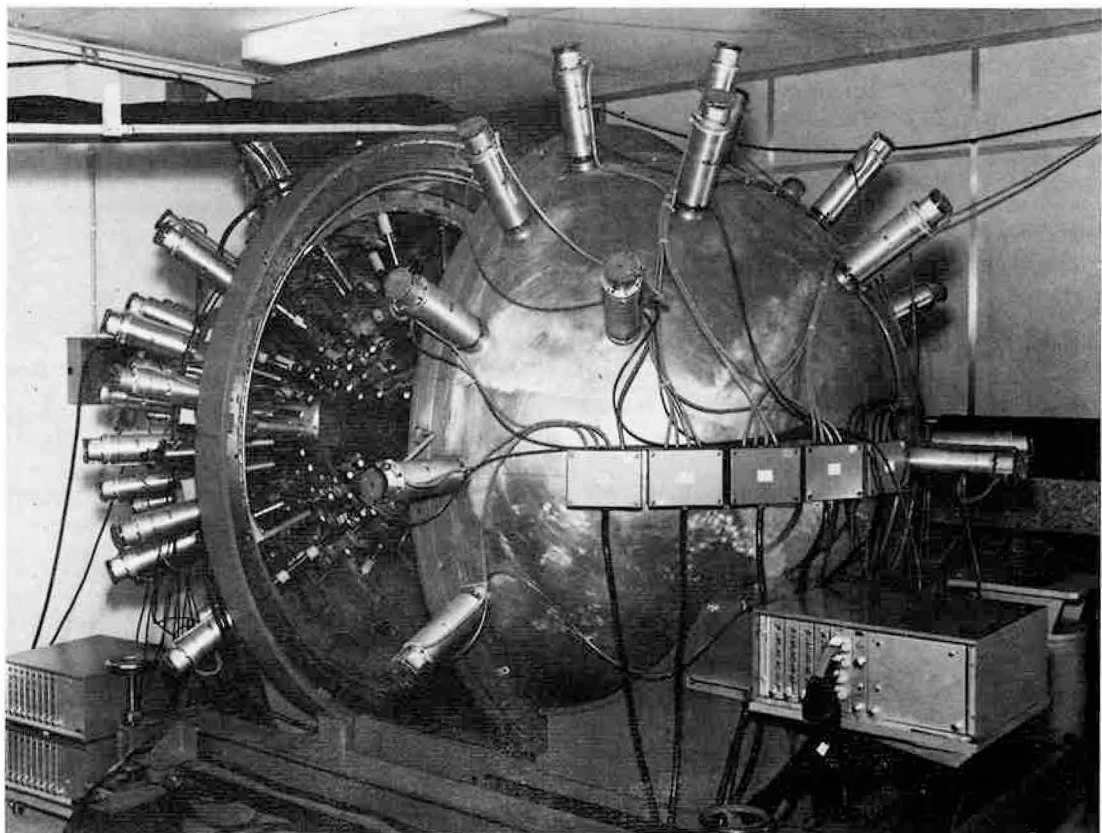


Figure 2 : Montage des multidétecteurs

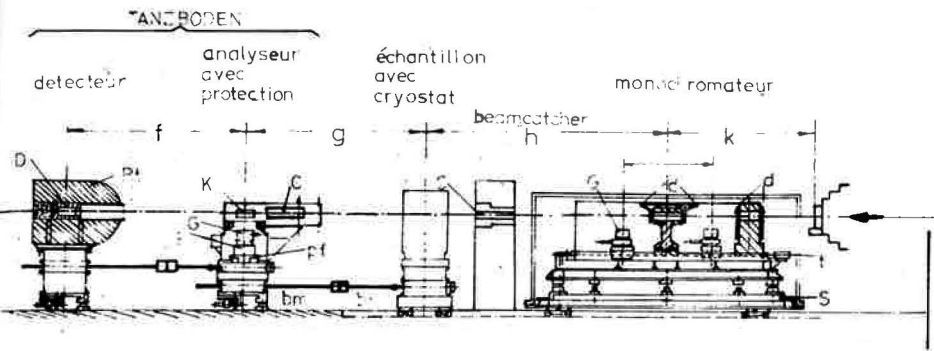


Figure 3 : Schéma du spectromètre à fonctions indépendantes : Monochromateur double, échantillon, analyseur et détecteur sur tanzboden

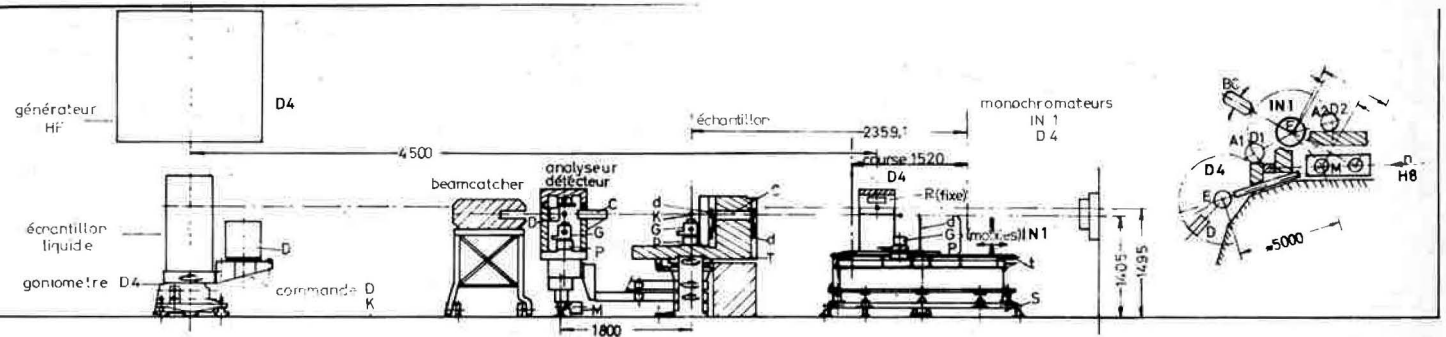


Figure 4 : Schéma du spectromètre avec monochromateur simple et deux ensemble indépendants analyseur-détecteur

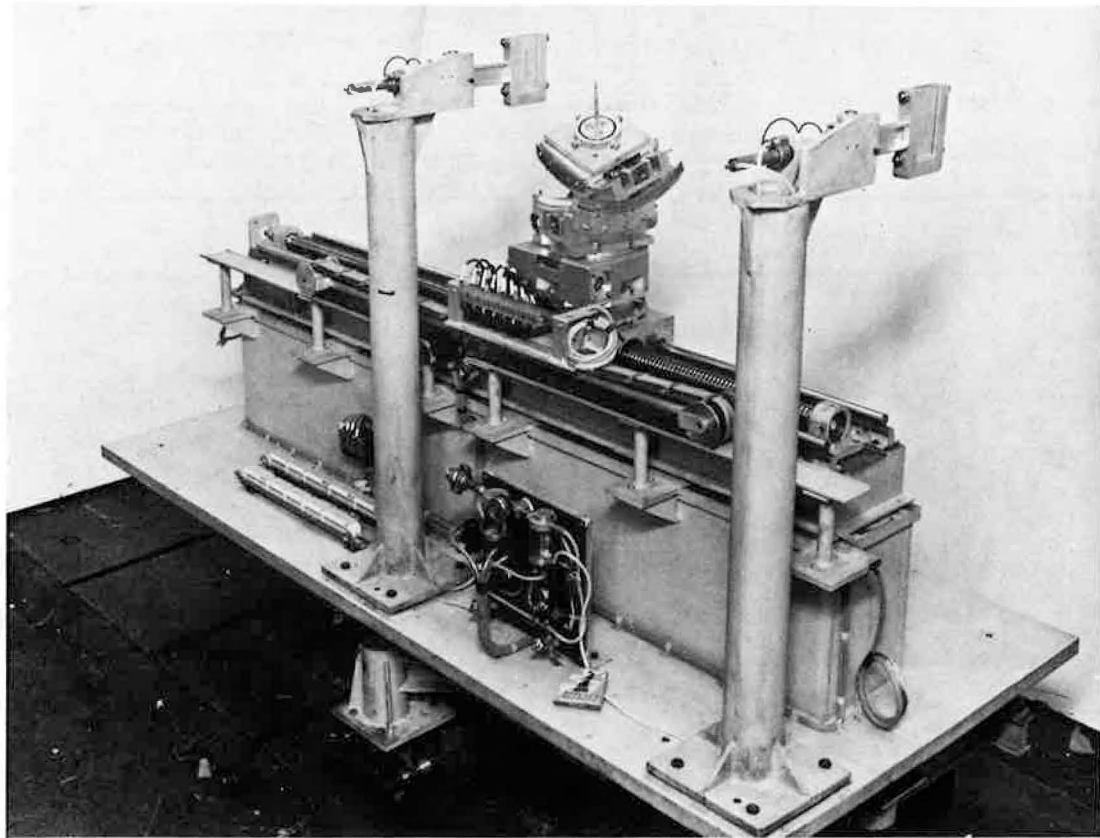


Figure 5 : Montage du monochromateur simple

A. Appareils à longueur d'onde fixe.

Ces appareils sont construits avec des unités capables de recevoir le cristal monochromateur tout en assurant

l'alignement, les réglages angulaires et la reproductibilité lors des changements de cristaux.

L'échantillon est placé par rapport au monochroma-

teur sur un goniomètre dont la position angulaire et la distance ont été prédéterminées. Ce goniomètre, qui est une unité complète, assure également la rotation des détecteurs autour de l'échantillon. La figure 1 montre une telle unité réalisée par la Société Allinquant France.

Dans le cas où la position peut être préétablie on prévoit l'utilisation de batterie de compteurs ou des multidétecteurs compacts développés par le Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Informatique, au CEN Grenoble. Pour des appareils de diffusion aux petits angles, l'analyse du faisceau est rendue possible par une longue base de vol, réalisée au moyen de conduits de neutrons débouchant sur un multidétecteur. Par ailleurs, pour l'observation des interférences produites par un faisceau de neutrons avec un échantillon cristallin, on utilise un appareil type "Igel ou Hérisson" qui comporte sur une sphère 100 détecteurs réglables angulairement. La Figure 2 présente cette unité réalisée par MAN Allemagne.

B. Appareils à longueur d'onde variable.

La position angulaire de l'échantillon peut être soit fixe, soit variable. Le premier cas peut conduire à des appareils où tous les paramètres, longueurs et angles entre échantillon et détecteurs, sont variables (Figure 3) ou à des appareils comportant plusieurs analyseurs et détecteurs (Figure 4). Pour ces appareils, l'échantillon reste fixe et le changement de longueur d'onde est donné par la translation du monochromateur. Cette translation peut être simple ou double. La figure 5 présente le montage du monochromateur simple réalisé par ACB France.

Les montages réalisés pour les appareils où l'échantillon est mobile angulairement et/ou tous les paramètres, longueurs et angles, sont variables (Figure 6), utilisent des composants normalisés et combinables entre eux. Ces ensembles se déplacent sur le sol au moyen de patins à air (système Tanzboden). Les bras de liaison entre les mobiles servent, après réglages, à maintenir les distances

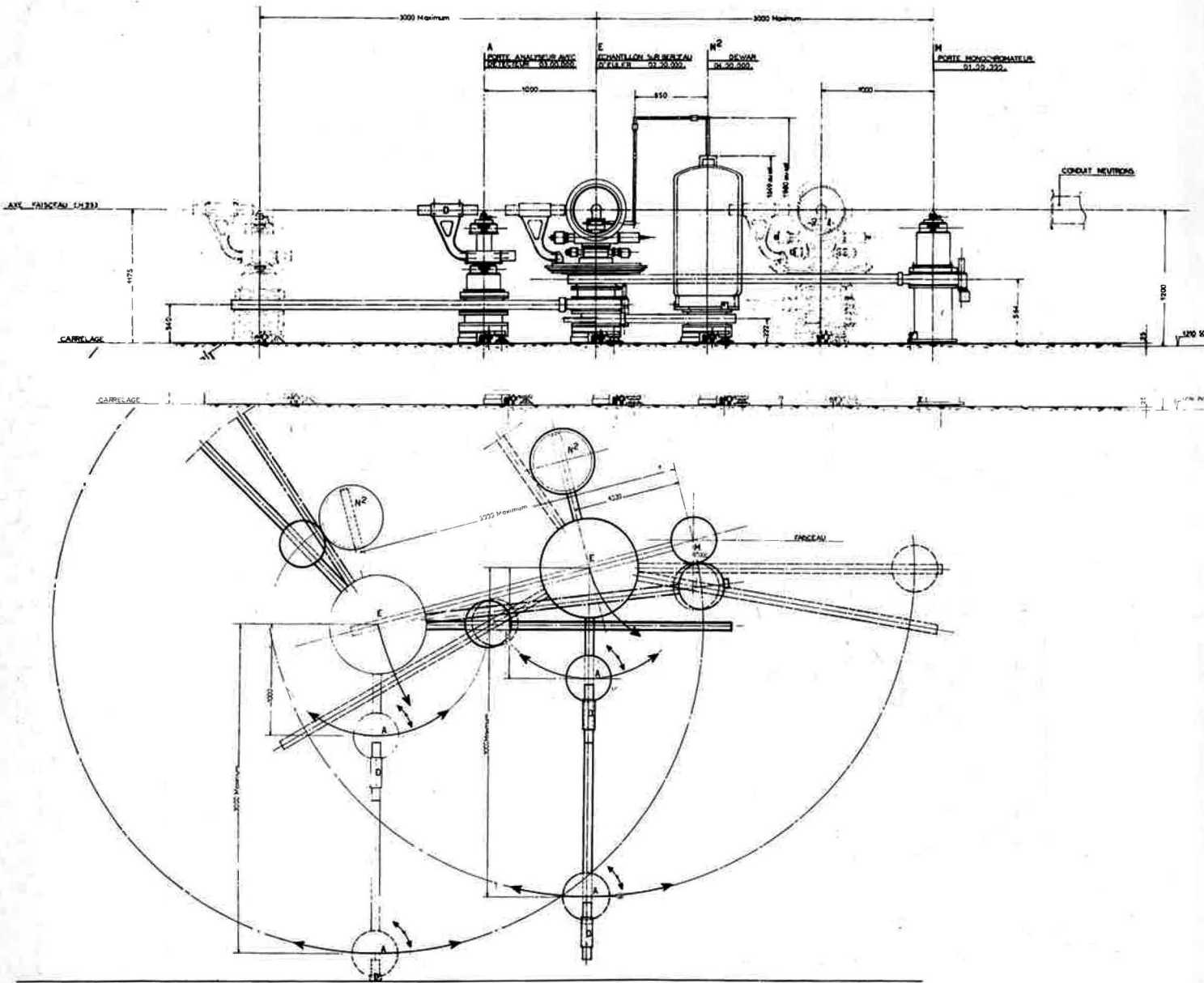


Figure 6 : Exemple complet d'un spectromètre à paramètres variables



Figure 7 : Montage de deux tables tanzboden munies d'un équipement d'orientation du cristal

fixes pendant l'expérimentation pour les appareils à contrôle optique et peuvent être utilisés comme moyen de transmission aux dispositifs de contrôles angulaires mécaniques et électroniques.

La première application de ce type de construction a été présentée à Genève en septembre 1971 (Figure 7).

II. SPECTROMETRES A FONCTIONS ASSOCIEES DE FACON RIGIDE

Pour ces appareils, les distances sont fixes dans la plupart des cas, seuls les paramètres angulaires sont considérés. La figure 8 représente un spectromètre classique de grande capacité, adapté aux expériences à neutrons polarisés, et qui est en construction en Allemagne.

III. APPAREILS D'ORIENTATION

On utilise pour l'orientation des cristaux monochromateurs ou analyseurs et des échantillons :

- des plateaux angulaires à axe vertical pour lesquels la précision de $1/100^\circ$ de degré est choisie ;

- des plateaux dits de réglage fin où la précision est meilleure que $1/300^\circ$ de degré ;
- des goniomètres pour charges lourdes avec 2 cercles (Figures 5 et 7) ;
- de petits goniomètres à un cercle ;
- des têtes goniométriques commercialisées, STOE par exemple ;
- des berceaux d'Euler à 3 cercles type Hilger-MAN.

IV. MACHINES TOURNANTES

Pour le monochromateur ou le générateur mécanique d'impulsions on utilise :

- des monochromateurs ou les filtres d'harmoniques à tambour tournant sous vide ou à l'air libre.
- Des choppers à disques de performances classiques : 100 à 150 m/s comme vitesse périphérique. Ces machines utilisent des technologies classiques avec, comme absorbeur de neutrons, des dépôts de fluorure de lithium ou d'araldite chargée de B_4C ou d'oxyde de gadolinium sur des disques minces en alliage d'aluminium.

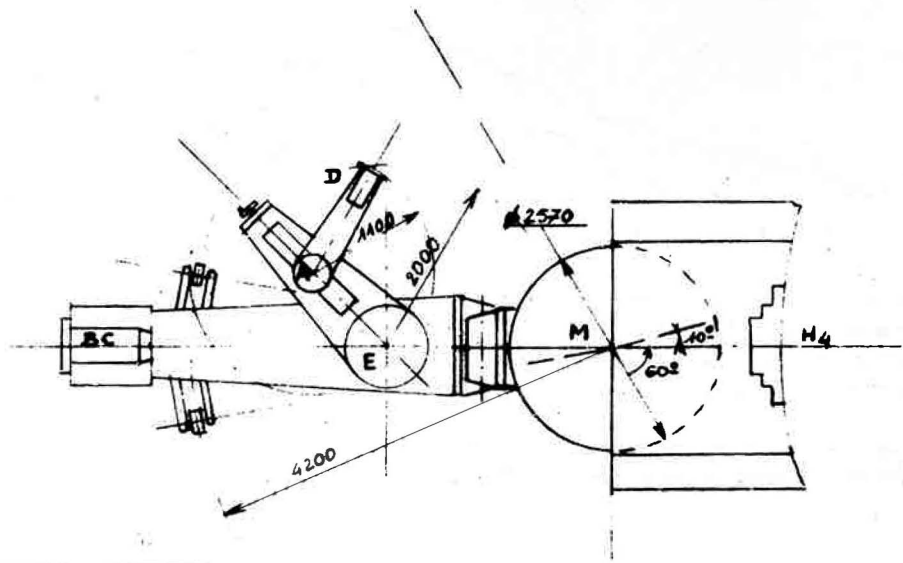
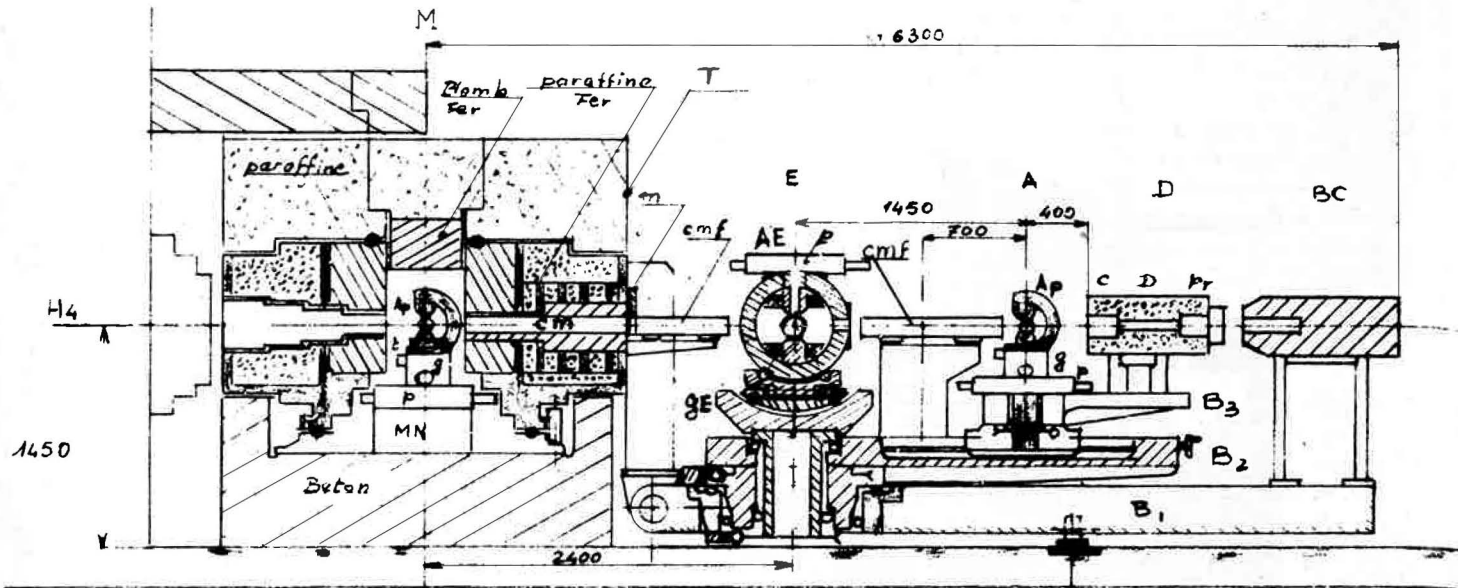


Figure 8 : Spectromètre à liaisons rigides

Un cas particulier concerne le chopper multiple qui est mécaniquement réalisé par la Société Bertin-Paris. Cet appareil est composé de 4 disques couplés électroniquement en phase et en vitesse, dont l'étude a été confiée à l'Euratom (ISPRA). Le disque, usiné par Turboméca ayant reçu le dépôt d'oxyde de gadolinium fait par Tréfimétaux, est placé sous vide dans un carter fabriqué par Merlin Gérin et est entraîné par un moteur synchrone Bertin. (Figures 9 et 10).

Chaque chopper est couplé au guide de neutrons, la vitesse d'utilisation de 20 000 t/mn permet d'obtenir une vitesse périphérique moyenne de 500 m/s au niveau de l'axe du faisceau (Figure 11).

V. APPAREILS DIVERS D'ENVIRONNEMENT DES CRISTAUX ET ECHANTILLONS

- Les électro-aimants et bobines supraconductrices pour les expériences avec les neutrons polarisés. Ces appareils sont précédés d'aimants permanents polariseurs et de canaux magnétiques de couplage.
- Les pressostats à très hautes pressions.
- Les appareils permettant une courbure variable de cristaux par gradient thermique.
- Les cryostats, pour lesquels la collaboration de l'Institut avec les centres de Jülich, Garching, Saclay et Grenoble est très étroite.

COUPE DU DISQUE POUR CHOPPER A ROTORS SYNCHRONISES

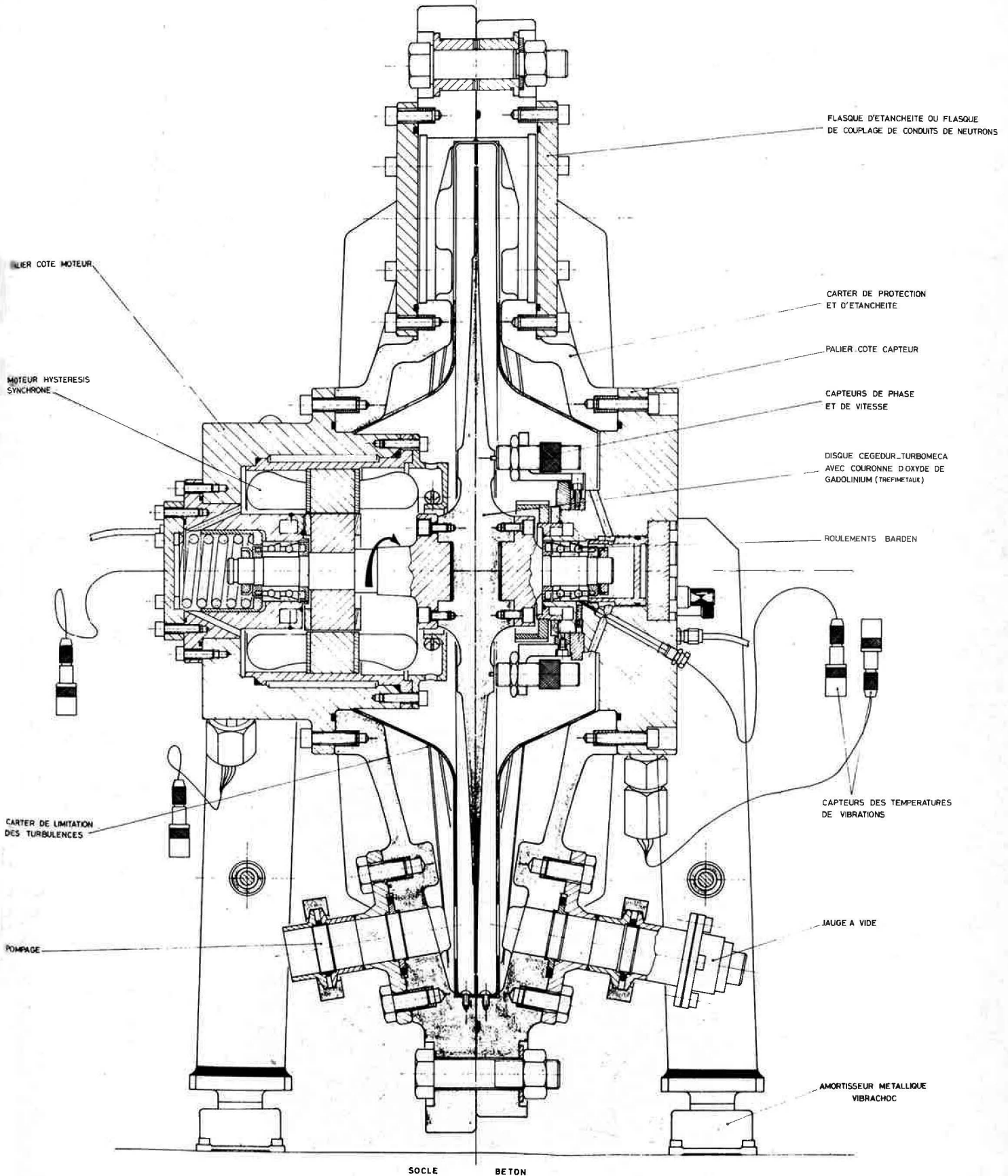


Figure 9 : Représentation du disque du chopper

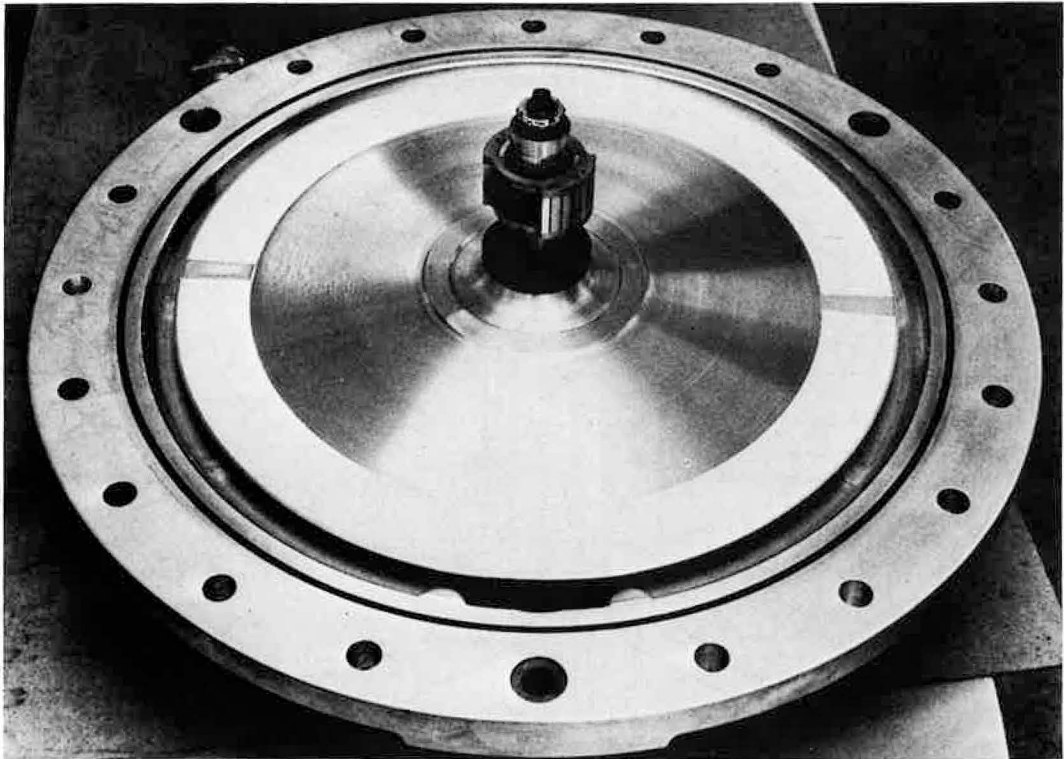


Figure 10 : Montage du disque avec moteur

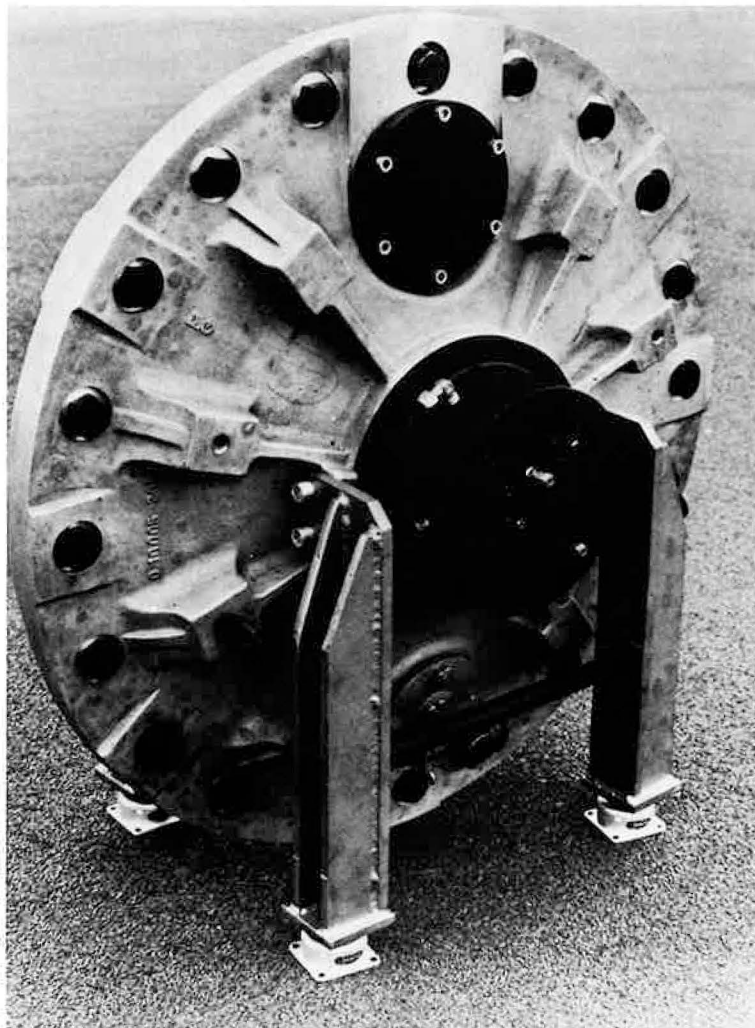


Figure 11 : Montage complet d'un ensemble chopper

Les spectromètres de physique nucléaire

J.C. FAUDOU*

Résumé :

Trois spectromètres sont destinées aux études de physique nucléaire. Deux d'entre eux analysent des particules chargées après avoir focalisé le faisceau à l'aide de systèmes d'optique ionique. Ces particules sont soit des produits de fission non ralentis, soit des électrons de conversion. Enfin un troisième type de spectromètre analyse les γ de capture des neutrons thermiques en séparant les énergies par réflexion sur un cristal courbé.

Summary :

Three spectrometers are designed for nuclear physics research. Two of these analyse charged particles after having focussed the beam by ionic optical systems, the particles being either non-attenuated fission products or conversion electrons. The third type of spectrometer analyses thermal neutron capture γ 's, separating the energies by reflection on a curved crystals.

Zusammenfassung :

Drei Spektrometer sind für die Studien der Kernphysik bestimmt. Zwei dieser Apparate untersuchen geladene Teilchen, nach ionenoptischer Fokussierung des Strahlenbündels. Diese Teilchen sind entweder nicht abgebremste Spaltprodukte oder auch Konversionselektronen. Eine Dritte Art von Spektrometer untersucht schliesslich, mittels Trennung der Energien durch Reflexion in einem Kristall, die Einfang γ der thermischen Neutronen.

I. SPECTROMETRE DE MASSE POUR L'ETUDE DES PRODUITS DE FISSION [1] (voir figure)

produits de fission successivement dans deux plans perpendiculaires entre eux.

A. But

La première lentille cylindrique est constituée par un champ magnétique homogène dont les lignes de force verticales produisent une première déviation du faisceau et une focalisation dans un plan horizontal.

Ce spectromètre est destiné à séparer des produits de fission non ralentis. Il permet de mesurer le rendement des produits de fission en fonction de la masse, de l'énergie et de la charge nucléaire.

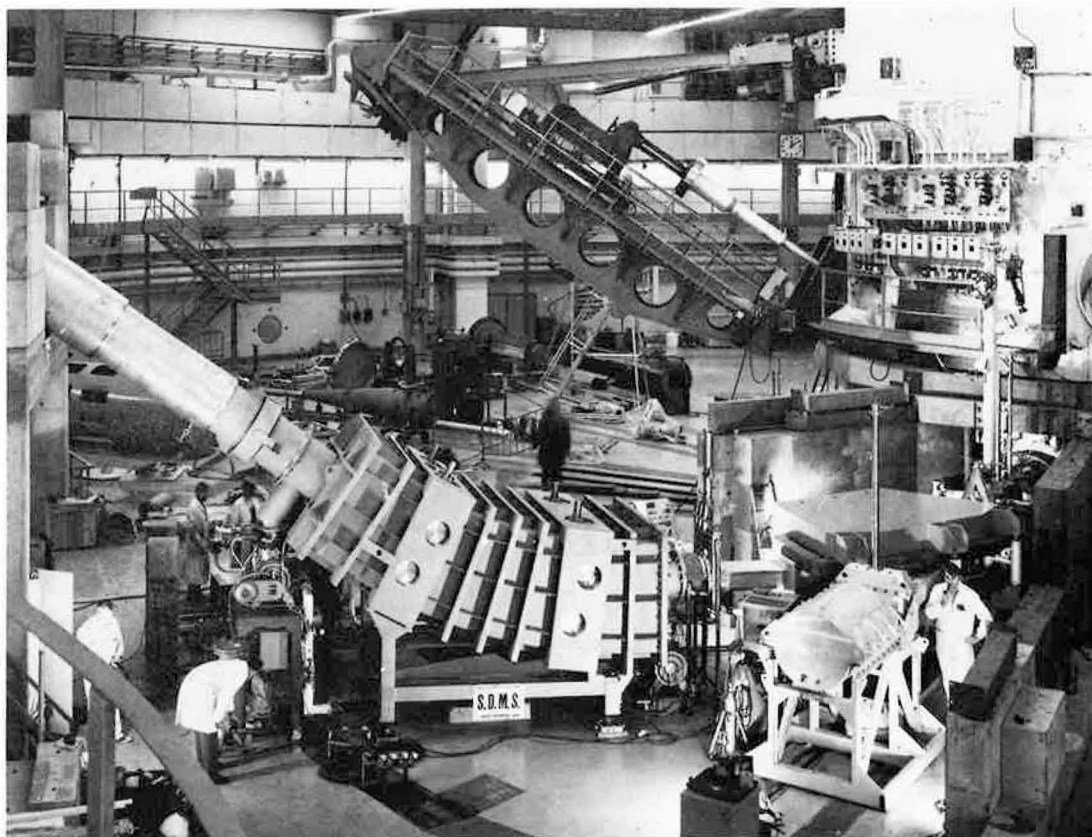
La deuxième lentille est un condensateur dont le champ électrique vertical focalise et dévie le faisceau dans cette direction.

B. Optique ionique

Le spectromètre de masse est constitué de deux lentilles cylindriques croisées qui focalisent le faisceau de

De la source, située à 8 m de l'entrée dans le champ magnétique, ce système optique donne une image dans un plan situé à 6,24 m de la sortie du condensateur.

*Institut Max Von Laue-Paul Langevin



Spectromètre de produits de fission "Lohengrin" Vue générale

Dans ce plan des ions de même charge, de même masse et de même vitesse représentent la source à peu près à l'échelle 1. Dans le cas des produits de fission, l'énergie cinétique a une distribution sensiblement gaussienne et l'image est constituée d'une série de paraboles (ou portions de paraboles).

C. Caractéristiques techniques essentielles

1. L'aimant

Angle de déviation : 45°
Rayon de déviation : 4 m
Section du faisceau à l'entrée de l'aimant : 320 x 80 mm
Champ magnétique maximum : 2 500 gauss
Homogénéité : 10^{-4} sur une largeur de pôle de 40 cm
Largeur de l'entrefer : 100 cm environ
Hauteur de l'entrefer : 25 cm

Une enceinte à vide indépendante est logée dans l'entrefer (voir l'article 4 de ce même numéro consacré aux dispositifs expérimentaux intégrés).

Etudié à l'ILL, l'aimant a été construit en Allemagne par Gutehoffnungshütte.

2. Le condensateur

Etudié à l'ILL et construit par la S.D.M.S. à St-Romans
Angle de déviation : $35,35^\circ$
Rayon de déviation : 5,6 m
Distance entre les plaques : 30 cm
Tension maximum de travail, entre les plaques : 600 kV.

La conservation de la charge ionique des fragments de fission exige un vide de 10^{-6} Torr, et l'obtention du champ électrique, très important, nécessite l'absence de toute trace d'hydrocarbure. Pour cette raison, tous les joints à vide sont montés sans graisse et les pompes à vide utilisées sont du type à très faible rétrodiffusion d'huile. (Pompes turbomoléculaires de Pfeiffer).

L'enceinte à vide de grande dimension (section 160 x 130 cm, longueur moyenne 4 m environ) qui contient le condensateur est construite en acier inoxydable, et l'intérieur poli mécaniquement. (Etat de surface avec aspérités résiduelles inférieures à $0,2\mu$. Rugosité arithmétique).

3. Dispositif de mesure

Dans son principe, il utilise une bande qui se déplace dans le plan de focalisation. Les produits de fission radioactifs constituant l'image se déposent sur la bande qui les transporte devant des compteurs appropriés.

II. SPECTROMETRE A ELECTRONS DE CONVERSION [2] [3]

Ce spectromètre est installé sur le canal vertical du réacteur (voir l'article 4 ci-dessus consacré aux dispositifs intégrés). Il est essentiellement constitué de deux électro-aimants.

A. Le premier dévie le faisceau d'un angle de 58° , avec un rayon de courbure de 50 cm. Il est destiné à fournir une première image à 85,7 cm de la sortie du champ magnétique, de la source qui est située à 1 370 cm dans le réacteur. La double focalisation est obtenue en utilisant successivement un secteur à champ non homogène (indice $1/r$) et un secteur à champ homogène.

B. Le deuxième aimant, qui est le spectromètre proprement dit, est symétrique. Le rayon de courbure est de 50 cm et l'angle de déviation total de 290° :

- 37° dans un champ homogène
- 216° dans un champ à indice $1/r$
- 37° dans un champ homogène

On obtient alors une image à 85,7 cm de la sortie de l'aimant.

L'image intermédiaire sert de source pour le deuxième aimant. Grâce à un système de fente, on peut en limiter la surface, ce qui permet d'éviter les effets perturbateurs dus à des différences entre les deux champs magnétiques.

C. Avec un entrefer de 45 cm de large pour une hauteur de 14 cm, on espère obtenir sur 15 cm de largeur une homogénéité supérieure à 5.10^{-4} , la résolution $\Delta E/E$ du spectromètre étant de 4.10^{-4} (à rapprocher de la meilleure résolution du spectromètre de MUNICH 8.10^{-4}). De même, si on définit une sensibilité

par le produit $s \cdot \Omega \frac{\Phi}{\sqrt{\gamma}}$ avec :

s = surface de source

Ω = angle solide de faisceau

Φ = flux de neutrons thermiques dans la source

γ = bruit de fond provenant du réacteur

Le spectromètre de Grenoble atteint 10^8 contre 2.10^6 à MUNICH.

Des ajustages sont prévus à l'aide de "shims" et de pièces tournantes permettant de régler l'angle d'incidence du faisceau dans le champ magnétique. La stabilisation du champ magnétique, dont la valeur maximum de travail ne dépasse pas 1 000 gauss, est obtenue à l'aide d'un système de bobines tournantes montées sur un axe unique. L'une d'elle est placée dans le champ du spectromètre, l'autre dans l'entrefer d'un aimant permanent dont la température est stabilisée. La différence entre les tensions ainsi obtenues permet, après mise en forme par un circuit électronique approprié, d'agir sur l'alimentation des aimants. Ce système, qui fonctionne actuellement à Munich, permet une stabilisation à 10^{-5} près.

Pour améliorer la statistique de comptage, il est possible de compter simultanément plusieurs points dans le plan de focalisation au moyen d'un détecteur à multifils (10 fils de 1/100 mm écartés les uns des autres de 2 mm). Ce multidétecteur est actuellement en cours d'études à MUNICH. L'ensemble a été étudié à ILL. Les électro-aimants sont en cours de fabrication dans les usines de OERLIKON, en France. Les enceintes à vide ont été réalisées en Allemagne, par Leybold Heraeus.

III. SPECTROMETRES POUR GAMMA DE CAPTURE DES NEUTRONS THERMIQUES

Quatre spectromètres gamma sont actuellement prévus sur le réacteur à haut flux. Pour trois d'entre eux, le faisceau de gamma provenant des captures des neutrons thermiques dans l'isotope à étudier est réfléchi par un cristal. Afin d'utiliser au mieux le faisceau malgré sa légère divergence, le cristal est courbé avec un rayon égal à la distance source-cristal. (Spectromètre à cristal du type Du Mond [4]). La courbure est obtenue par serrage du cristal entre deux pièces d'acier présentant une très bonne surface cylindrique au rayon désiré (écart avec la surface théorique inférieur à 10^{-4} mm).

La mesure très précise des angles de réflexion est obtenue à l'aide d'un interféromètre enfermé dans une enceinte thermostatée et permettant une précision d'angle de l'ordre de $0,05''$. Entre le cristal et le détecteur, le faisceau traverse un collimateur SOLLER focalisant sur la source.

Pour les deux spectromètres situés à 24 m, le collimateur mesure 4 m de longueur. Il est constitué de plaques de plomb antimonié disposées dans le sens de la longueur du collimateur. L'épaisseur des plaques est de 1,5 mm à $\pm 3/100$ mm. La distance entre deux plaques consécutives est au minimum, près du cristal, de 3 mm. La divergence correspond à une augmentation de l'écart de 3 mm sur 24 m soit de l'ordre de 0,1 mm par mètre. Pour le spectromètre à 5,76 m, la longueur du collimateur est de 1,4 m, les plaques ont une épaisseur de 1 mm. Le détecteur est enveloppé dans une protection destinée à l'isoler du bruit de fond du hall du réacteur. Les détecteurs liés aux deux spectromètres de 24 m sont ainsi enfermés dans une casemate de béton dont les murs et le toit atteignent 80 cm d'épaisseur. Les fenêtres rectangulaires par lesquelles les collimateurs mobiles pénètrent dans l'enceinte sont munies de blocs liés au collimateur de façon à assurer une protection continue. Pour limiter les échauffements nucléaires du porte source, l'atmosphère du canal est maintenue à 2 Torr d'hélium. L'effet de diffusion des photons ne permet pas une pression supérieure. Cette pression est contrôlée en permanence par la mesure de la conductibilité thermique du gaz. Les variations de cette conductibilité au-delà de seuils fixés agissent sur un double circuit de pompage primaire ou d'introduction d'hélium.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P. ARMBRUSTER, H. EWALD, G. FIEBIG, H. LAWIN, E. MOLL, H. WOLLNICK. Spectromètre de masse pour l'étude des produits de fission (original allemand).
- [2] T.V. EGIDY. Proceeding of the International Symposium on Neutron Capture gamma ray spectroscopy Studsvik (1969).
- [3] H. MALHEIM. Nuclear Instruments and Methods, 53,229, (1967).
- [4] J.W.M. DU MOND and H.A. KIRKPATRICK, Rev. Sci., Instr. 1 (1930) 88.

Gestion automatisée des expériences

Par M. TEASCHNER *

Résumé :

La plupart des expériences de l'Institut seront gérées avec l'aide de calculateurs. Ils se chargeront :

- du contrôle et de la surveillance des expériences,
- de l'acquisition des données expérimentales,
- du contrôle et du prétraitement des données.

Le Centre de Calcul comprend 2 calculateurs T 2000 (Système CARINE) et 2 calculateurs TR 86 (Système NICOLE). Des petits calculateurs (PDP 11) équipent certaines expériences.

Summary :

Most of the ILL experiments will be run with the help of computers, which will :

- *control and supervise the experiments,*
- *collect experimental data,*
- *check and pretreat the data,*

The computer facilities consist of 2 T 2000 computers (CARINE system) and 2 TR 86 computers (NICOLE system). Certain experiments are equipped with small computers (PDP 11).

Zusammenfassung :

Die meisten Versuche des ILL werden mit Hilfe von Rechnern durchgeführt folgende Tätigkeiten übernehmen :

- die Steuerung und die Überwachung der Versuche,
- die Erfassung der experimentellen Daten,
- die Prüfung sowie die Vorbehandlung der Daten

Die Rechenanlagen umfassen zwei Rechner T 2000 (CARINE-System) sowie 2 Rechner TR 86 (NICOLE-System). Einige Experimente sind mit Kleinrechnern (PDP 11) ausgerüstet.

La plupart des expériences de l'Institut seront gérées avec l'aide des calculateurs. Les travaux essentiels sont :

- Contrôle et surveillance des expériences,
- Acquisition des données expérimentales.
- Contrôle et prétraitement des données.

1

Douze expériences avec des tâches complexes concernant leur contrôle et surveillance, mais avec des exigences faibles concernant l'acquisition des données, seront branchées au système CARINE par l'intermédiaire d'un système CAMAC (Spectromètres et diffractomètres).

*Institut Max Von Laue-Paul Langevin

Configuration du système CARINE

- 2 calculateurs T 2000 (Télémechanique Electrique) 2 x 32-K-mots, 19 bits ; 1,5 μ s cycle de base,
- 2 disques à tête fixe, 256-K-mots, 10 ms.
- 4 bandes magnétiques, 9 pistes, 800 Bpl.
- 16 machines à écrire, 10 c/s.
- 2 perforateurs/lecteurs de ruban, 50/110 c/s.
- 2 lecteurs de cartes, 400 cartes/minute.
- 1 écran de visualisation avec clavier, moniteurs de télévision.

Il existe un système superviseur temps réel avec disque (RTDMS). Chaque expérience est équipée d'une machine à écrire. L'écriture du déroulement d'une expérience est programmé en FORTRAN. A l'aide d'une simulation d'expériences, les programmes peuvent être testés dans un centre de calcul (IMA-Grenoble, IBM 360/65/67). La réalisation du système a été confiée au Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique du CEN Grenoble.

2

Six expériences avec des exigences importantes d'acquisition concernant le taux d'acquisition et le volume des données, seront branchées au système NICOLE par l'intermédiaire d'une électronique de transmission des données spécialement développée (chopper statistique, diffraction à petits angles, spectromètre de masse).

Configuration du système NICOLE

- 2 calculateurs TR 86 (AEG-Telefunken). resp. 32-K, 64-K-mots à 24 bits ; 0,9 μ s cycle de base.
- 2 disques à tête fixe, 2.10⁶ Bytes, 17 ms.
- 2 bandes magnétiques, 9 pistes, 800 Bpl.
- 2 machines à écrire, 10 c/s.
- 2 perforateurs/lecteurs de ruban, 75/500 c/s.

- 2 lecteurs de cartes, 400 cartes/minute.
- 1 imprimante rapide, 375 lignes/minute.
- 6 écrans de visualisation avec clavier.

Il existe un superviseur temps réel avec disque (CALAS 70, RESY 71). Chaque expérience est équipée d'un écran de visualisation avec clavier pour le lancement de programmes, l'entrée de paramètres et la présentation de spectres. L'écriture d'une expérience se fait en langage assembleur. La réalisation du système est effectuée par IDT/DUZ/GfK-Karlsruhe.

Les systèmes CARINE et NICOLE sont installés ensemble à un endroit central, tel qu'ils sont éloignés en moyenne de 100 m des expériences du réacteur et des guides de neutrons.

3

Trois expériences avec des travaux divers (ex. : incrémentation mémoire) seront équipées de petits ordinateurs (n -, β -, γ - spectromètres).

Configuration des petits calculateurs

- 2 calculateurs PDP 11 (Digital Equipment Corporation) resp. 8-K, 12-K-mots à 16 bits ; 0,9 μ s cycle de base.
- 6 bandes magnétiques, DEC-Tape.
- 1 perforateur/lecteur, 300/50 c/s.
- 3 machines à écrire, 10 c/s.
- 1 écran de visualisation.

Les bandes magnétiques seront utilisées pour le stockage des programmes et des données expérimentales. La réalisation de l'incrémention mémoire, la connexion de l'électronique des expériences au calculateur et la programmation du déroulement des expériences se font à l'Institut.

Organisation de l'exploitation

Par Y. DROULERS*

I. RESPONSABILITES PARTICULIERES DANS L'EXPLOITATION DU REACTEUR

Le Directeur de l'Institut, exploitant nucléaire, a la responsabilité des installations de l'Institut. Il est assisté du Chef des Services Techniques et du Chef du Service Exploitation du Réacteur.

Le Chef des Services Techniques est plus particulièrement chargé de la sécurité générale des installations et de la protection contre les rayonnements.

Pour l'accomplissement de cette tâche, il dispose de personnel appartenant à l'Institut et d'une assistance technique des services de sécurité du C.E.N.-GRENOBLE.

Le Chef du Service Exploitation du Réacteur est chargé d'assurer le fonctionnement du réacteur et de ses annexes (détritiation, source froide, source chaude...). Le personnel dont il dispose assure le pilotage du réacteur (équipes de quart), les travaux d'entretien et de maintenance nécessaires au fonctionnement des installations et l'exploitation des mesures neutroniques.

L'ingénieur de service assume, sous les ordres du Chef du Service Réacteur, la responsabilité d'intervention immédiate dans les différentes phases de fonctionnement du réacteur (démarrage, accidents, arrêt). Dans ce but, il peut être appelé, à son domicile, par téléphone, de jour et de nuit, par la salle de contrôle du réacteur.

Le Chef de quart est responsable de l'exécution du programme de fonctionnement du réacteur dans le cadre des consignes générales d'exploitation et les consignes particulières qui lui ont été fixées par le Chef du Service Exploitation,

En cas d'incident ou d'anomalies, il prévient l'Ingénieur de service ; néanmoins il lui appartient de prendre la responsabilité des manœuvres dont l'exécution doit se faire sans délai pour des raisons de sécurité, que le danger soit de nature nucléaire ou classique.

II. ORGANISATION DU SERVICE REACTEUR

Le Service Réacteur est organisé de la manière suivante :

a) 5 équipes de service continu :

Dans chaque équipe :

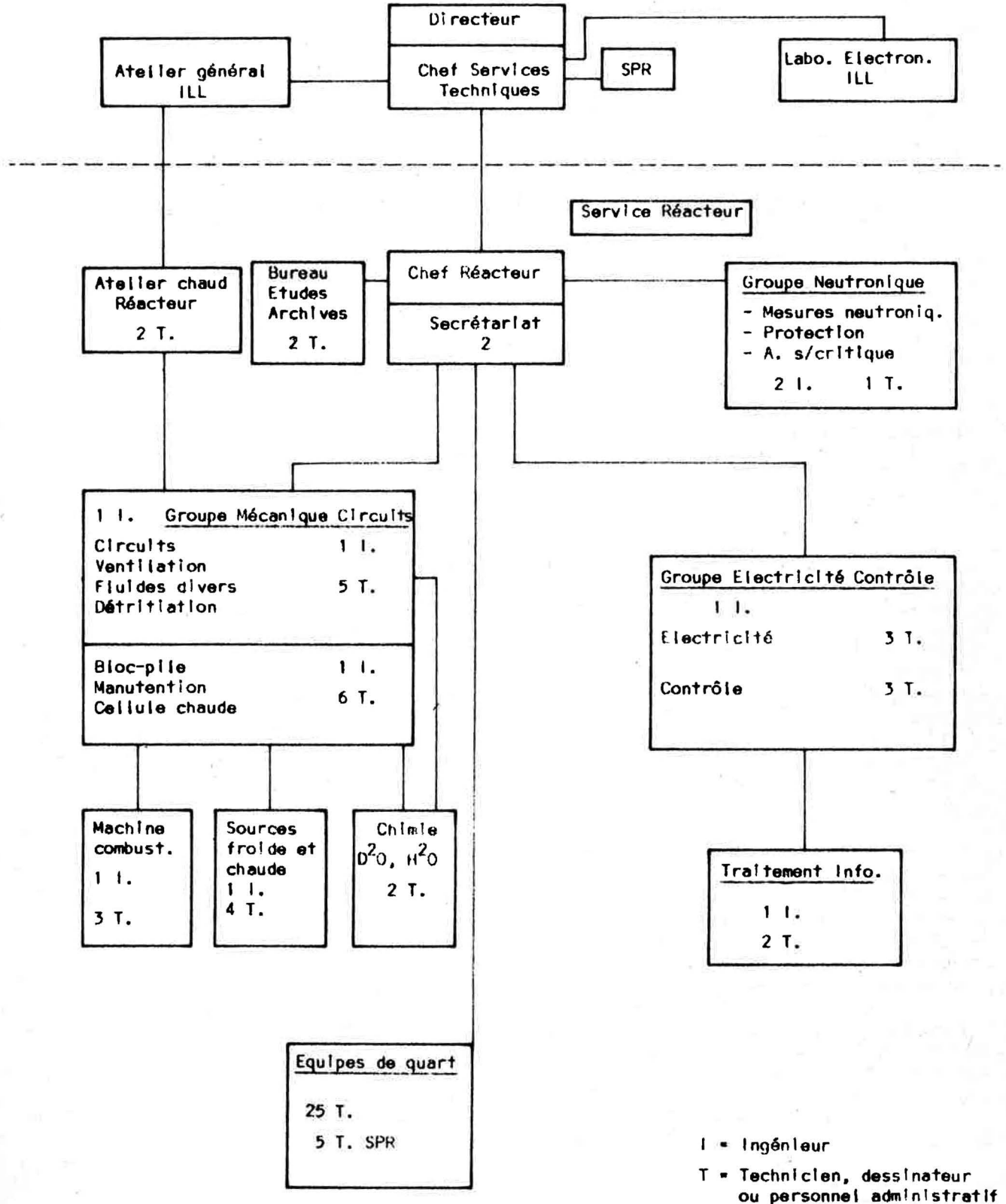
- 1 Chef de quart,
- 1 conducteur de pile (technicien électronique),
- 1 technicien mécanicien,
- 1 technicien électricien,
- 1 technicien électro mécanicien pour la surveillance générale des dispositifs expérimentaux,
- 1 agent du Service de Protection contre les Rayonnements.

*Chef d'exploitation du R.H.F.

ORGANIGRAMME DU SERVICE REACTEUR

Cet organigramme correspond à l'organisation en vigueur au moment du démarrage du réacteur.

Il sera adapté en fonction de l'expérience d'exploitation du réacteur.



b) Groupe Mécanique :

Ce groupe est chargé de l'entretien et des modifications des sous-ensembles : circuits, ventilation, bloc-pile, canaux, détritiation, cellule chaude, manutention générale.

Des ingénieurs et techniciens sont plus spécialement affectés au fonctionnement et à l'entretien des dispositifs spéciaux : machine de déchargement du cœur, sources chaude et froide, usine de détritiation.

De même, divers locaux du réacteur sont équipés, soit en atelier d'intervention rapide sur des pièces contaminées, soit en laboratoire de chimie pour les diverses mesures liées au fonctionnement de la détritiation et au contrôle permanent de l'eau lourde.

c) Groupe Electricité-Contrôle.

Ce groupe est chargé de l'entretien et des modifications des sous-ensembles liés à la distribution électrique et au contrôle du réacteur.

Certains agents du groupe sont, notamment, affectés à la machine de traitement de l'information intégrée au contrôle du réacteur.

d) Groupe Neutronique

Ce groupe est chargé des mesures de flux neutroniques, des calculs de protection et de la gestion de l'assemblage sous-critique destiné au contrôle des éléments combustibles neufs.

Planning et coûts de l'opération Réacteur à Haut Flux

Par J. CHATOUX*

I. PLANNING

Les principales dates du planning de montage peuvent être résumées de la façon suivante :

- Signature du contrat de la création de la Société LAUE-LANGEVIN janvier 1967 ;
- Remise de l'avant-projet pour accord au Comité Directeur : octobre 1968 ;
- Lancement de l'appel d'offres gros oeuvre : mi 1968 ;
- "Premier coup de pioche" pour gros oeuvre : décembre 1968 ;
- Fin béton, radier et jupe étanche : début 2e trimestre 1969 ;
- Fin coupole béton : premier trimestre 1971 ;
- Achèvement des bétons intérieurs et plancher : début du 4e trimestre 1970 ;
- Fin piscine inox : mai 1970 ;
- Fin montage partie basse du bloc-pile : janvier 1971 ;
- Fin montage structure supérieure bloc-pile : février 1971 ;
- Fin montage des mécanismes de contrôle : mi janvier à juillet 1971 ;
- Fin montages des circuits D_2O dans le radier : mi 1971 à fin 2e trimestre 1971 ;
- Fin montage partie haute des circuits D_2O ; début 1971 à mi 1971 ;
- Installation électrique générale :
 - . début montage des tableaux HT et BT : fin 3e trimestre 1971
 - . fin essais de contrôle pour divergence : mi août 1971 ;
- Première divergence du réacteur : 31 août 1971 ;
- Fin des travaux et essais de 2e phase : de septembre 1971 à décembre 1971 ;
- Première montée en puissance : début le 16 décembre, fin le 21 décembre 1971.

Il convient de rappeler que depuis l'origine (en 1967), le réacteur devait monter en puissance "au cours du second trimestre 1971". Nous avons visé en fait le début du 4e trimestre, nous n'avons pu tenir que la fin décembre.

*Chef du Projet R.H.F.

II. ANALYSE DES COUTS

Prix hors taxes, hors révisions de prix (mais phénomènes monétaires compris) en kF *

A. Coût des constructions

1. Site et infrastructure	6 900
Chantier	1 750
Total	8 650
2. Bâtiments de l'Institut	20 576
Total	20 576
3. Etudes préliminaires d'avant projet	
. neutronique	4 999
. mécanique	4 488
. combustible	5 211
. hydraulique et thermique ...	1 151
. contrôle électricité	307
. sûreté	187
Total	12 305

4. Etudes de réalisation

. études générales (dont 13 100 KF contrat A. I)	16 554
. bloc réacteur	3 710
. refroidissement	987
. contrôle-commande	764
. génie civil	610
. manutention	1 114
. ventilation fluides divers ...	401
Total	21 982

5. Travaux de construction du réacteur

. généralités	150
. bloc-pile	15 461
. combustible et matière nucléaire	19 179
. refroidissement	22 620
. contrôle électricité	20 000
. génie civil	37 000
. manutention	14 700
. ventilation - fluides divers ...	7 900
. essais de démarrage	965
Total	137 975

6. Dispositifs expérimentaux intégrés au réacteur

. études diverses	156
. source froide	7 100
. source chaude	2 037
. canal à produits de fission ...	564
. canal traversier	409
. canal β	787
. pneumatique	910
. bouchons et collimateurs ...	1 826
. conduits de neutrons	3 227
Total	17 016

7. Frais de personnel et de gestion des équipes d'études et de construction (de 1967 à 1972)

Total de l'investissement constructions 238 244

B. Dispositifs expérimentaux non intégrés

1. Diffusion inélastique	2 940
2. Diffraction	9 560
3. Physique nucléaire	2 708
4. Autres dépenses :	
. guides neutrons	735
. acquisition de données	5 535
. protection amovible	1 554
. dépenses communes	4 009
. frais de personnel	6 507
Total	18 340

Total des dispositifs expérimentaux non intégrés :
33 548

C. Frais de fonctionnement de l'Institut

(depuis la création jusqu'à la divergence du réacteur).
47 080.

D. Provision pour variations économiques

15 336.

Il faut remarquer, à titre d'ordre de grandeur, que depuis le premier devis présenté par l'Equipe Projet en octobre 1967, nos dépenses ont supporté :

- 59 MF d'actualisation économique
- 25 MF d'incidences monétaires
- 10 MF de révisions de prix.

Ce premier devis date d'octobre 1967 ; il avait été établi sur les bases économiques de janvier 1967 et se montait à 225 MF hors taxes.

Nous voyons qu'à francs constants, ce devis a été correctement respecté, puisque le devis actuel de :
335 MF est à rapprocher de :

$$255 \text{ MF} + 59 \text{ MF} + 25 \text{ MF} + 10 \text{ MF} - 15,3 \text{ MF} = 333,7 \text{ MF}$$

E. L'Institut disposera en 1972 d'un budget annuel de fonctionnement de 53 000 KF hors taxes, se décomposant approximativement de la façon suivante :

- Frais de personnel	20 700 KF
- Exploitation du réacteur	15 800 KF
- Services techniques généraux	2 150 KF
- Administration générale	1 950 KF
- Fonctionnement scientifique	9 100 KF
- Divers et provisions pour imprévus ..	3 300 KF

*1 KF = 1 000 Francs

Principales firmes ayant participé aux études et à la réalisation du réacteur à haut flux

TITULAIRE	DESIGNATION DU MARCHE
INTERATOM-G.A.A.A. - GERI VERITAS SOCOTEC SOGREA RUBY MECASOL ESCO SCHELLING GERI J. LEFEBVRE et PELLER LEON GROSSE I.G.N. P. DARD SOCALTRA T.N.E. TRINDEL C.E.A. M.A.N. SOGREA M.A.N. SUD-AVIATION G.A.A.A. CERCA/NUKEM G.E.R.I. C.E.R.C.A. NUKEM C.E.A. INSTITUT DE SOUDURE CERCA NUKEM G.A.A.A. M.A.N. G.A.A.A. G.E.R.I. SERETE C.E.S.T. PRECISAVIA CEGEDUR FORGEAL NEYRPIC/BABCOCK-ATLANTIQUE DELLE C.E.A. DELLE NEYRPIC NEYRPIC GAAA SOGREA ICARE T.B.T. T.B.T. RECOMAT MERLIN-GERIN SCHOTT et GENOSSEN TECHNOCHIMIE BABCOCK-WILCOX (Allemagne)	Architecte Industriel Prestation de contrôle général Prestations de contrôle de génie civil Film Etudes hydrauliques Etudes mécaniques des sols Sondages de petits diamètres Etudes d'architecture Etudes d'implantation générale Remblais généraux Ouvrage de captage du Drac Travaux de topométrie Réseau eau potable et incendie Mise et maintien en propreté nucléaire de la zone eau lourde Prestations de main d'oeuvre et travaux divers Mise à disposition de main d'oeuvre et fournitures diverses Utilisation du réacteur EOLE Etudes expérimentales d'hydraulique Etudes des cavitations Etudes hydrauliques de la tête de l'élément combustible Etudes des contrôles par U.S. Etudes mécaniques du bloc-pile Etudes d'assemblage d'éléments combustibles par soudure par bombardement électronique. Etudes aménagement piscine Fourniture de pré-série de plaques combustibles. Fourniture de pré-série de plaques combustibles. Assistance technique et commerciale pour la fabrication des éléments combustibles Essais fondamentaux de soudage en AG3 et maquettes correspondantes Fabrication d'éléments combustibles Fabrication d'éléments combustibles Etudes du démontage des canaux Etudes des vibrations du bloc-pile Etudes des bouchons porte collimateurs Etude de l'équipement de séchage Etudes de séchage du bloc-pile et circuits primaires. Essais de compensateurs en AG3 NET. Trains d'ondes pour soufflets R.H.F. Tôles en AG3 NET Ebauches forgées en AG3 NET écrouté. Bloc-pile et aménagement piscine Mécanisme du réacteur Assemblage sous-critique FOEHN Outillage de démontage de la barre de sécurité. Fantôme des sources et du canal bêta. Casse-siphon sur le bloc pile Etudes des circuits primaires et secondaires Etude équipement de la station de pompage Détecteurs de deutérium. Analyseur d'oxygène et de deutérium Analyseur de la détritiation Appareil de mesure du titre d'eau lourde. Détecteurs de tritium. Glaces de protection en local B 62. Boîte à gants pour analyseur de deutérium Echangeurs eau lourde Circuits primaires, circuits d'eau déminéralisée, circuits secondaires. Echangeurs eau légère

TITULAIRE	DESIGNATION DU MARCHE
<p>HALBERG ARMATUREN-RING SULZER MULLER-DEGREMONT HALBERG RATEAU T.B.T. LE JOINT FRANCAIS WANNER ISOFI SIEMENS-A.E.G. C.E.A. (Radioéléments)</p> <p>MERLIN-GERIN</p> <p>M.T.U. SIEMENS—A.E.G. - MERLIN GERIN A.M.S. GERI C.E.B.T.P.</p> <p>SOCOTEC LEON GROSSE STRABAG BAU GERI STRABAG LEON GROSSE C.E.S.T. M.P.G. S.P.R. CAMPENON Bernard/STRABAG BAU/ HOLZMANN/FUSSLER/C.M.P./NOELL CUYNAT DOMPNIER REYDEL</p> <p>Groupement S.P.R./JIVAL/SILFOR</p> <p>RIVOIRA FORESTIER M.A.N. CUYNAT POUJAUD NESSI INTERATOM-G.A.A.A. - GERI</p> <p>INTERATOM</p> <p>TRANSNUCLEAR INTERATOM BABCOCK-WILCOX (Allemagne) SCHOTT DRATH-SCHRADER WALISCHMILLER BOUVIER DEMAG-ZUG NOELL NEYRPIC L.A.M. MARCELLIN-SEVEYRAC L.A.M. KRANTZ</p>	<p>Pompes principales et pompes auxiliaires à eau lourde Vannes et clapets eau lourde Station de détritiation Station remplissage et épuration Pompes secondaires Soufflantes pour gaz de couverture Analyseur d'oxygène et de deutérium dans l'azote Joints toriques Calorifugeage des circuits Etudes d'électricité et contrôle Sources radioactives Tableaux 15 kV et 5,5 kV Tableaux 380 V Transformateurs Diésel Installation électrique générale Eclairage et petite force motrice Plans guides de génie civil Etablissement des spécifications techniques des structures du bâtiment bloc-pile. Contrôle des études de génie civil Bâtiment bureaux-laboratoires 1ère tranche Bâtiment Institut 2e tranche Second oeuvre bâtiment réacteur Bâtiment détritiation et source froide Bâtiment conduits de neutrons et informatique Essais des enceintes du réacteur Serrureries Bâtiment pile et peinture en bâtiment Génie civil - structures principales</p> <p>Ouvrages extérieurs Menuiseries et serrureries diverses Maçonneries diverses Revêtements spéciaux et revêtements de sols coulés Peintures et vitreries Revêtements de sol collés Plomberies et sanitaires Ascenseurs et monte-charges Bâtiment de la station de pompage Isolation phonique et thermique Chauffage du bâtiment de la station de pompage Etudes préliminaires de déchargement par hotte Etudes manutention classique Etudes cellule chaude et équipements spéciaux Etude du chargement et déchargement de l'élément combustible Etude du château de plomb Hottes de déchargement Ossature et équipements parois de la cellule chaude Fenêtre de la cellule chaude Pont roulant de la cellule chaude Manipulateurs légers Convoyeur immergé cellule chaude Ponts roulants classiques Ponts roulants spéciaux Equipement de manutention des canaux expérimentateurs Ponts roulants du bâtiment de la station de pompage Levage du pont tournant Monorails divers Etudes ventilation</p>

TITULAIRE	DESIGNATION DU MARCHE
<p>G.E.R.I. KRANTZ SOCALTRA FORESTIER CEA (P.C.B.T.) AIR LIQUIDE G.F.K. G.A.A.A. HERAEUS S.D.M.S. CREUSOT-LOIRE DAUPHELEC NEYRPIC A.M.E.-C.E.N./G A.M.E.-C.E.N./G G.E.R.I. LAMSON A.C.B. M.A.N. ALSTHOM/JOBIN YVON LEMER VERITAS</p>	<p>Etudes des circuits des fluides divers Ventilation nucléaire Fluides divers Circuits extérieurs : eau de ville et incendie Etude et réalisation de la source froide. Réfrigérateur de la source froide. Etude et réalisation de la source chaude. Source froide - Etude du bouchon BP Source froide - Bouchon en bloc-pile Source froide - Circuits de vide et deutérium. Source froide - Ballast de deutérium Source froide - Tableau de contrôle Equipement expérimental pour le canal traversier Equipement expérimental du canal tangentiel H9. Equipement expérimental pour canal β vertical Etudes des circuits pneumatiques Fourniture et montage des circuits pneumatiques Réalisation des bouchons porte-collimateurs Vannes de sécurité des canaux H6, H7, H9 et speciaux. Réalisation des conduits de neutrons Equipement du canal H1-H2 partie en pile. Réalisation de la cellule blindée LMA-C.E.N. de Grenoble. Prestations de contrpoles techniques des dispositifs expérimentaux intégrés au réacteur.</p>