

Les aspects neutroniques et thermiques. L'élément combustible

Par L. BREGEON * F. LAFAURIE ** et J.P. SCHWARTZ *

I. - CONCEPTION DU COEUR

Flux élevés de qualité

Le but essentiel du coeur est de fournir un flux de neutrons thermiques élevé au nez de canaux destinés à extraire des faisceaux de neutrons "particularisés". La qualité demandée à ce flux exige que le bruit de fond en neutrons rapides et épithermiques, ainsi qu'en échauffement γ pour la plupart d'entre eux, soit aussi faible que possible. De plus, les vingt canaux occupent un volume important où l'on doit trouver une souplesse suffisante pour procéder aux modifications et adaptations des dispositifs expérimentaux. Les recherches sur la conception du coeur ont tendu à la réalisation de ces objectifs, dans un cadre technologique déjà éprouvé, aux meilleures conditions économiques.

Coeur-source

Ces études ont conduit à un coeur-source entouré d'un réflecteur de grand volume. Le coeur est largement

sous-modéré, de sorte que la plupart des neutrons rapides sortent du coeur, diffusent et se ralentissent dans le réflecteur. Ils y créent un pic de flux de neutrons thermiques, près duquel le nez des canaux est placé. Des neutrons thermiques en proportion suffisante rentrent dans le coeur où ils sont absorbés et entretiennent la réaction en chaîne.

Réflecteur d'eau lourde

Le réflecteur doit ainsi constituer un bon ralentisseur, peu absorbant ; il doit avoir une longueur de diffusion assez grande pour que le pic de flux thermique se produise relativement loin du coeur, à un endroit où les flux rapides, épithermiques et gamma ont décréu notablement. Neutroniquement, seuls pouvaient convenir l'eau lourde et le béryllium. Mais, alors que la décroissance des flux rapide et épithermique est du même ordre dans l'eau lourde et le béryllium, la décroissance du flux thermique est trois fois plus faible dans l'eau lourde que dans le béryllium, où l'on est obligé d'introduire environ 5% d'eau naturelle pour en assurer le refroidissement. Cet avantage, joint à la souplesse supérieure apportée par un réflecteur liquide, a fait adopter l'eau lourde comme réflecteur.

* Division d'Etude et de Développement des Réacteurs, CEN de Saclay

** Direction des Productions, CEN de Fontenay-aux-Roses.

Élément combustible Al

Pour obtenir un "rendement" satisfaisant, c'est-à-dire un rapport flux maximum dans le réflecteur/puissance du réacteur, élevé, le coeur devait être de faible volume, donc avoir une charge spécifique en combustible importante. Par ailleurs, le flux, principalement lié à la puissance spécifique sur la surface extérieure du coeur, imposait par son niveau de 10^{15} n cm⁻² s⁻¹ au nez des canaux ($1,5 \cdot 10^{15}$ n cm⁻² s⁻¹ flux non perturbé) une valeur élevée de la puissance spécifique : 3,3 MW/dm³ au point chaud. On atteint ainsi un domaine de hautes performances pour l'élément combustible, pour lequel on a retenu en effet la technologie "aluminium", celle-ci étant bien connue et ce domaine se trouvant déjà exploré. Ce dernier argument est d'ailleurs celui qui a grandement contribué à assigner une valeur raisonnable au flux, les avantages retirés d'un réacteur poussé dans ses derniers retranchements avec des flux plus élevés étant inférieurs à ceux d'un réacteur au flux moindre, mais dont la souplesse et la sécurité de fonctionnement sont plus grandes.

Trou central avec une barre de contrôle unique

La meilleure utilisation des neutrons a conduit à un coeur de forme cylindrique, avec un trou central qui accroît réactivité et rendement. Il est utilisé pour le contrôle et la compensation, par l'intermédiaire d'une barre unique.

Réfrigérant eau lourde

Le réfrigérant pouvait être de l'eau lourde ou de l'eau naturelle. Le choix n'étant pas facile, une étude poussée a été entreprise sur la comparaison des deux solutions ; les résultats en sont exposés dans un rapport commun C. E. A.—G. F. K. [1]. Ils ont conduit à préférer l'eau lourde : la principale raison est la sécurité que nous apporte l'eau lourde dans la réalisation de l'objectif fixé, par rapport aux aléas techniques de la version eau naturelle (performances de l'élément combustible à la limite du domaine connu, problèmes d'étanchéité et de tenue sous irradiation de matériaux de structure).

On aboutit ainsi à un coeur annulaire sous-modéré, refroidi et réfléchi par l'eau lourde.

II. - DETERMINATION DU COEUR

Basée sur le calcul

Pour déterminer la géométrie du coeur, on s'est appuyé essentiellement sur des calculs, en ce qui con-

cerne les caractéristiques neutroniques, alors que les paramètres thermodynamiques étaient obtenus par des corrélations faisant largement appel aux expériences. Dans ce but, on a recherché et construit une méthode de calcul neutronique suffisamment précise pour assurer la détermination du coeur, en s'attachant à évaluer convenablement la réactivité et les pics de puissance dans un coeur où les gradients de spectre sont très importants. Une expérience critique, FOEHN, réalisée à EOLE s'est cependant avérée nécessaire pour estimer les perturbations en réactivité et en flux dues à la présence des canaux ; elle s'est montrée également indispensable pour mettre au point la méthode de calcul des barres de sécurité ; quant au coeur proprement dit, elle a permis de vérifier le bon accord des résultats expérimentaux avec les calculs [2].

Élément combustible type HFIR

Déterminer le coeur demandait en premier lieu de se fixer un élément combustible. Des études ont été entreprises à la fois sur des coeurs avec caisson résistant à la pression et sur des coeurs formés d'éléments combustibles tubulaires, tenant chacun individuellement la pression. La solution à élément-tube de force a été rejetée pour des raisons neutroniques de mauvais rendement. Face à des éléments combustibles en secteur d'anneau, du type utilisé aux U. S. A. dans le Advanced Test Reactor, on a retenu l'élément combustible monobloc, formé de 280 plaques combustibles assemblées entre deux viroles, du type High Flux Isotope Reactor. Il comporte en effet des avantages sensibles :

- coeur monobloc facile à manipuler pour le déchargement ;
- absence de caisson ;
- répartition de puissance plus favorable, la zone combustible étant un réseau homogène plaques-eau ;
- conditions d'emploi des plaques plus favorables du point de vue efforts et contraintes ;
- conception mécanique d'ensemble nettement meilleure.

185 g U₂₃₅/dm³ 15,5 m/s entre les plaques

Les contraintes mécaniques, thermohydrauliques et de fabrication, essentiellement liées à l'élément combustible, ont fixé la plupart de ses paramètres et délimité le domaine de recherche de la configuration du coeur :

- La charge en uranium a été fixée à la valeur limite couramment fabriquée ; s'agissant de poudre d'U Al₃ dispersée dans une matrice d'aluminium, on a adopté

une proportion de 33 % d'uranium pour laquelle on possédait une référence américaine de fabrication et surtout de tenue sous irradiation. La tenue sous irradiation a d'ailleurs été le principal critère de choix de ce combustible, face à l'oxyde U_3O_8 .

- La plaque combustible de 1,27 mm d'épaisseur et 0,38 mm de gaine a été conservée. La gaine a été réalisée en alliage d'aluminium avec : 1 % de Fe et 1 % de Ni qui donnent à l'alliage une bonne résistance à la corrosion, 1 % Mg, 0,2 % Mn et 0,3 % Cr pour augmenter les caractéristiques mécaniques ($\sigma_R \geq 17,5$ h bars $\sigma_E \geq 8$ h bars ; $A \geq 18$ %) 0,10 % Zr et 0,05 % Ti. La composition de cet alliage résulte d'études de corrosion réalisées en autoclave [3].
- Le canal d'eau a été déterminé par des considérations thermiques. Pour une épaisseur de plaque, une vitesse d'écoulement du réfrigérant et une pression à la sortie du coeur données, l'épaisseur du canal d'eau détermine la puissance extractible par unité de volume du coeur. L'épaisseur qui permet d'extraire la puissance maximale correspond dans notre cas à une valeur légèrement supérieure à 2 mm. L'optimum étant très plat, on a préféré choisir un canal de 1,8 mm pour augmenter la charge spécifique en combustible (à pourcentage donné d'uranium dans la "viande") et diminuer les températures dans l'uranium ; on obtient ainsi $185 \text{ g } U_{235}/\text{dm}^3$.
- La largeur de plaque l entre les viroles a été limitée à 8 cm environ afin de rester dans le domaine d'efforts et de déformations dont on avait l'expérience pour HFIR ; dans ce réacteur, la plaque de l'élément inférieur a 8,4 cm de large et l'on sait que les déformations varient approximativement en l^4 et V^2 .
- La vitesse de l'eau V entre les plaques est une donnée, liée à la précédente, que l'on a prise égale à 15,5 m/s (valeur HFIR), compte tenu de la puissance spécifique élevée à évacuer ($2,4 \text{ MW}/\text{dm}^3$ dans le filet chaud).

4,35 bars à la sortie du coeur

Par ailleurs, on a fait le choix préliminaire d'une faible pression dans le réflecteur, 4 bars, pour diminuer l'épaisseur des structures et les inconvénients qu'elle entraîne (échauffements λ , perturbations de flux et de réactivité) ; jointe à l'adoption, logique, d'un circuit unique d'eau lourde coeur et réflecteur, cette option entraîne une pression faible également à la sortie du coeur : 4,35 bars.

30 % d' U_{235} brûlé en moyenne

Il restait, pour calculer la réactivité initiale, à se fixer un taux de combustible moyen. Il existe une valeur qui

conduit au coût minimum du cycle de combustible. Un taux de combustion supérieur ne pourrait être obtenu qu'au prix d'une augmentation de réactivité, donc de volume, diminuant le rendement et augmentant la puissance ; ce surprix serait supérieur au gain dû à un taux de combustion plus élevé, abaissant le nombre annuel d'éléments à fabriquer. Une telle étude demande pour être menée à bien de façon exacte beaucoup de temps et des éléments économiques que nous ne possédions pas. Nous nous sommes donc bornés à une étude assez schématique, sur des bases approchées. Elle a mis en évidence un minimum du coût du cycle pour environ 30 % U_{235} brûlés ; ce minimum étant assez plat a paru un objectif raisonnable. Il conduit à un taux de combustion maximum de 60 %, sans danger pour la tenue sous irradiation (étant données les températures atteintes, 147° C . à l'interface plaque-eau).

$$H = 80 \text{ cm } R_e = 19,5 \text{ cm } R_i = 14 \text{ cm}$$

A partir de ces contraintes, on a déterminé les dimensions du coeur. La hauteur H se déduit des calculs thermiques, car elle détermine l'enthalpie de l'eau dans le filet chaud. On s'est fixé une marge de 1,5 par rapport au phénomène dangereux qu'est la redistribution de débit, celle-ci pouvant être prévue par le calcul à partir des lois physiques établies expérimentalement. Dans ce but des essais systématiques ont été réalisés au Service des Transferts Thermiques du CEN/G [4]. On a ainsi adopté une hauteur de 80 cm. Les rayons ont été ensuite calculés pour atteindre la réactivité liée aux astreintes ci-dessus, ainsi qu'aux caractéristiques générales du réacteur taille du réflecteur de 2,5 m de diamètre, nombre, nature et configuration des canaux ; le rendement demandant un rayon extérieur R_e faible et la limite de puissance spécifique une zone combustible mince, on aboutit aux valeurs suivantes, pour la zone active : rayon extérieur 19,5 cm, rayon intérieur 14 cm. On achève alors de préciser la région active en introduisant du bore à chaque extrémité des plaques combustibles ; on élimine le point chaud à l'aval des plaques et on abaisse de 20° C . sa température ; on diminue de 4 000 pcm la compensation à exercer par la barre de contrôle, limitant ainsi son efficacité et par conséquent le pic de puissance d'une part et son échauffement d'autre part.

5 barres de sécurité

Enfin, cinq barres de sécurité, en chutant dans le réflecteur, viennent faire écran aux neutrons thermiques rentrant dans le coeur et assurent l'arrêt d'urgence du réacteur, ainsi que la sous-criticité lors du chargement. L'unicité de l'élément combustible pose en effet un problème particulièrement sensible du point de vue criticité.

III. - REALISATION — PERFORMANCES

Le coeur physiquement déterminé se présente ainsi en trois zones coaxiales. (Figure 1).

Barre de contrôle en nickel

La barre de pilotage centrale en nickel (Figure 2), assure le contrôle du réacteur et la compensation nécessaire en dehors de celle apportée par le bore. Sa géométrie particulière est destinée à limiter le relèvement de puissance radial. Le talon de 40 cm de haut évite en effet une surépaisseur de la barre par rapport à ses 6 mm effectifs. Il apporte le supplément d'antiréactivité nécessaire à la sous-criticité à froid, mais s'efface presque complètement (de 23 cm) dès le démarrage.

280 plaques combustibles assemblées à 2 viroles par bombardement électronique

L'élément combustible (Figure 3) est formé de 280

plaques en développante de cercle, (Figure 4) solidaires de deux viroles en alliage d'aluminium A S G - T6 ($\sigma_R \geq 28$ h bars, $A \geq 8\%$).

Les plaques ont 899 mm de haut ; elles comprennent à chaque extrémité un noyau boré de 30 mm de haut. Le diamètre extérieur de la virole externe est 413,6 mm, son épaisseur 8 mm ; le diamètre intérieur de la virole interne est 260,8 mm, son épaisseur 6,5 mm ; la hauteur totale de l'élément est 1 475,98 mm. Ce coeur monobloc, encore davantage qu'un coeur modulaire, oblige à une réalisation sûre. Des études étalées sur plus de quatre ans se sont déroulées chez les fabricants CERCA et NUKEM, pour définir un processus de fabrication de l'élément. Les plaques étant considérées comme délicates à réaliser, mais de technologie connue, l'effort a porté essentiellement sur l'assemblage. La liaison plaques-viroles a été réalisée par soudure par bombardement électronique ; la qualité des pièces de structure (viroles), la détermination de l'assemblage proprement dit des plaques dans les rainures des viroles, la définition des paramètres de soudure (puissance, vitesse de défilement, fréquence de vibration du faisceau), l'étude d'une séquence pour les 25 cordons circulaires internes et les 25 cordons externes, la limitation des déformations et le respect des tolérances générales (notamment de l'épaisseur des canaux) ont constitué les objectifs primordiaux.

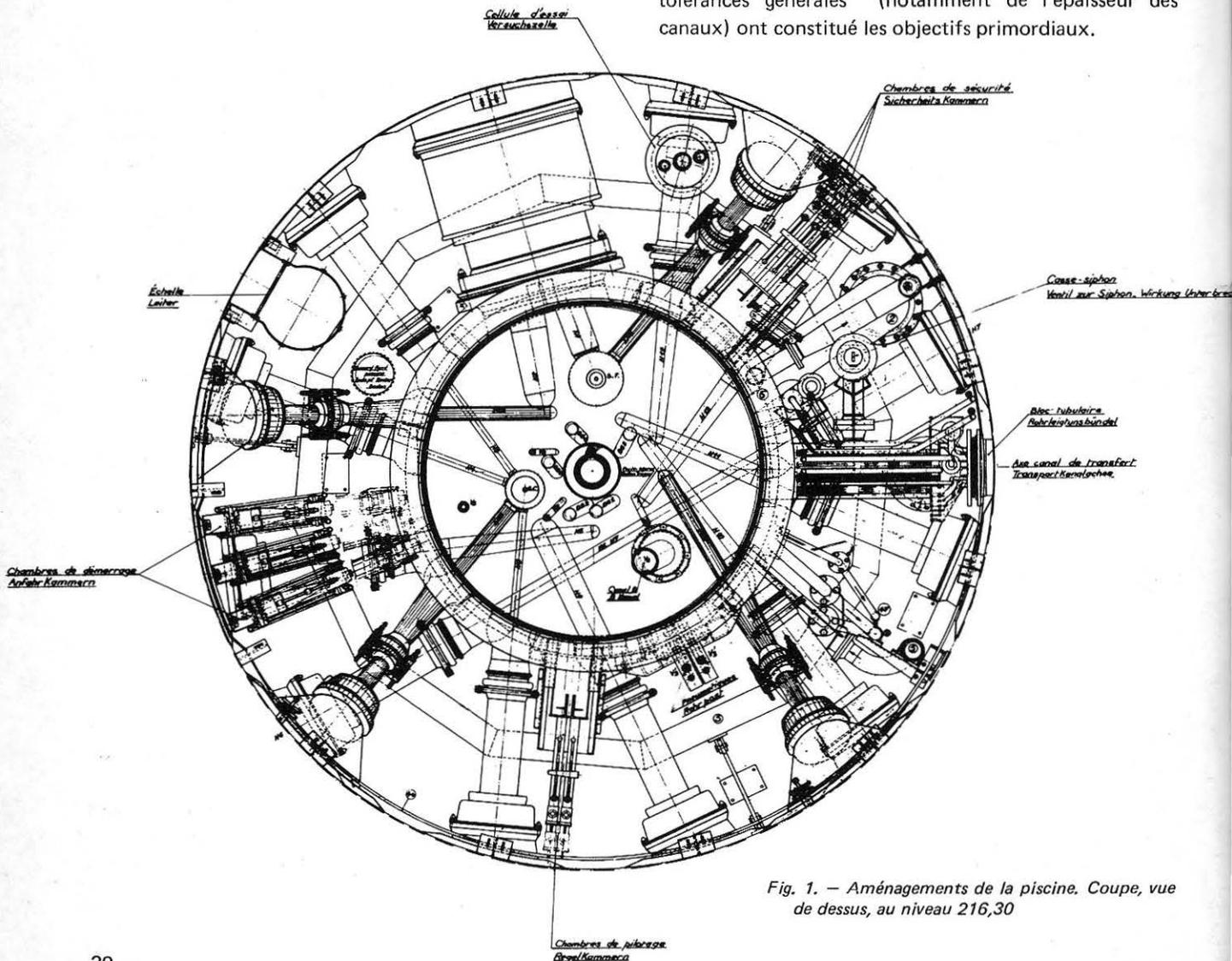


Fig. 1. — Aménagements de la piscine. Coupe, vue de dessus, au niveau 216,30

TABLEAU I

Caractéristiques de l'élément combustible

La plaque combustible	hauteur	899	mm	
	épaisseur	1,27	mm	
	épaisseur de l'âme	0,51	mm	
	épaisseur de gaine	0,38	mm	
	hauteur active	800	mm	
	rayon intérieur	140	mm	pour la zone active
	rayon extérieur	195	mm	pour la zone active
	surface d'échange	10,77	dm ²	
	hauteur de chaque noyau boré	30	mm	
	charge en U ₂₃₅	30,6	g	
	charge en B ₁₀	10,3	mg/noyau	
L'élément combustible	épaisseur du canal d'eau	1,8	mm	
	nombre de plaques combustibles	280		
	charge totale en U ₂₃₅	8,57	kg	
	charge totale en B ₁₀	5,77	g	
	surface d'échange	30,17	m ²	
	volume actif	46,3	dm ³	
	rayons de la virole intérieure	130,4	mm	— 136,9 mm
	rayons de la virole extérieure	198,8	mm	— 206,8 mm

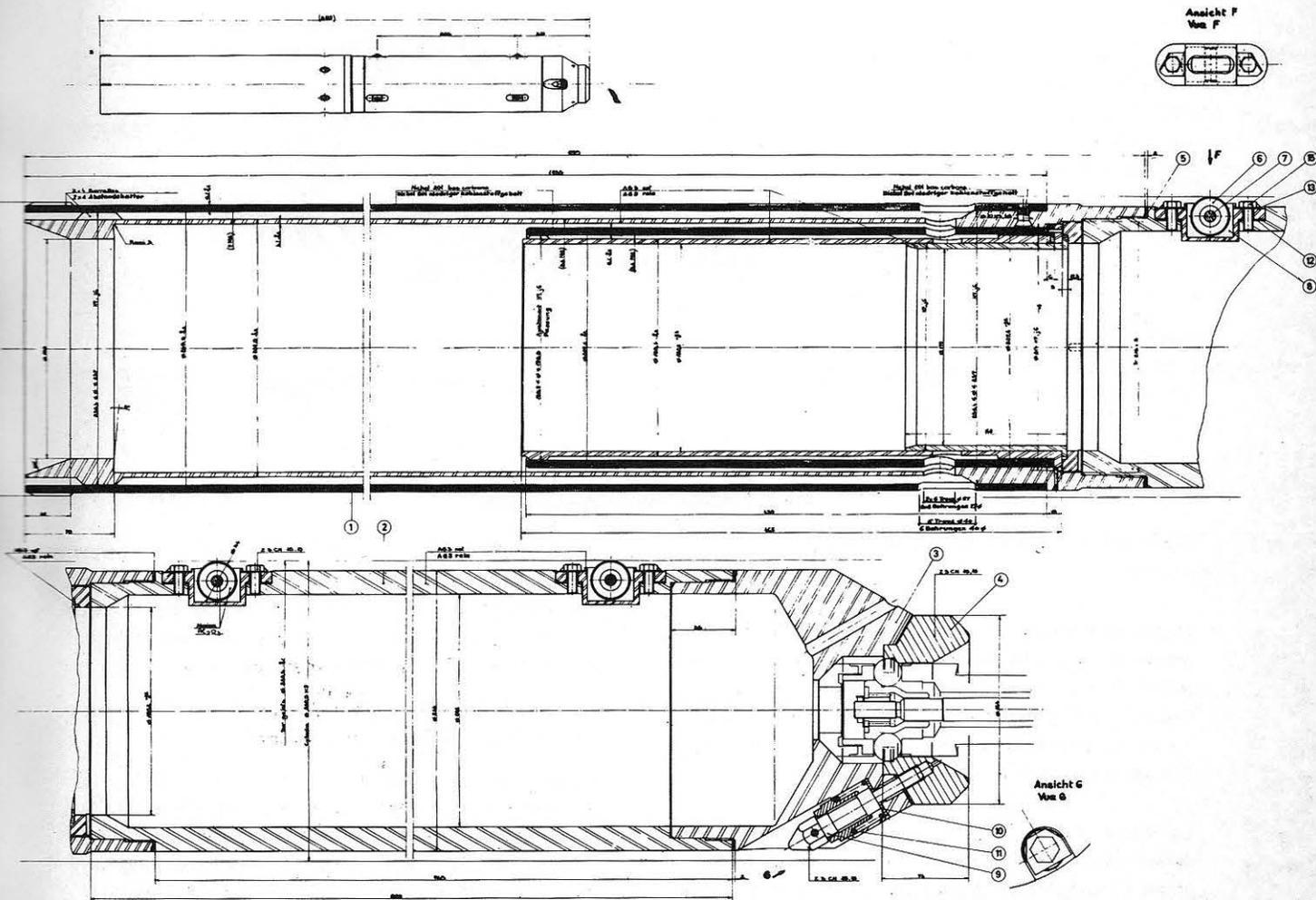


Fig. 2. — Barre de pilotage, élément absorbant et chariot

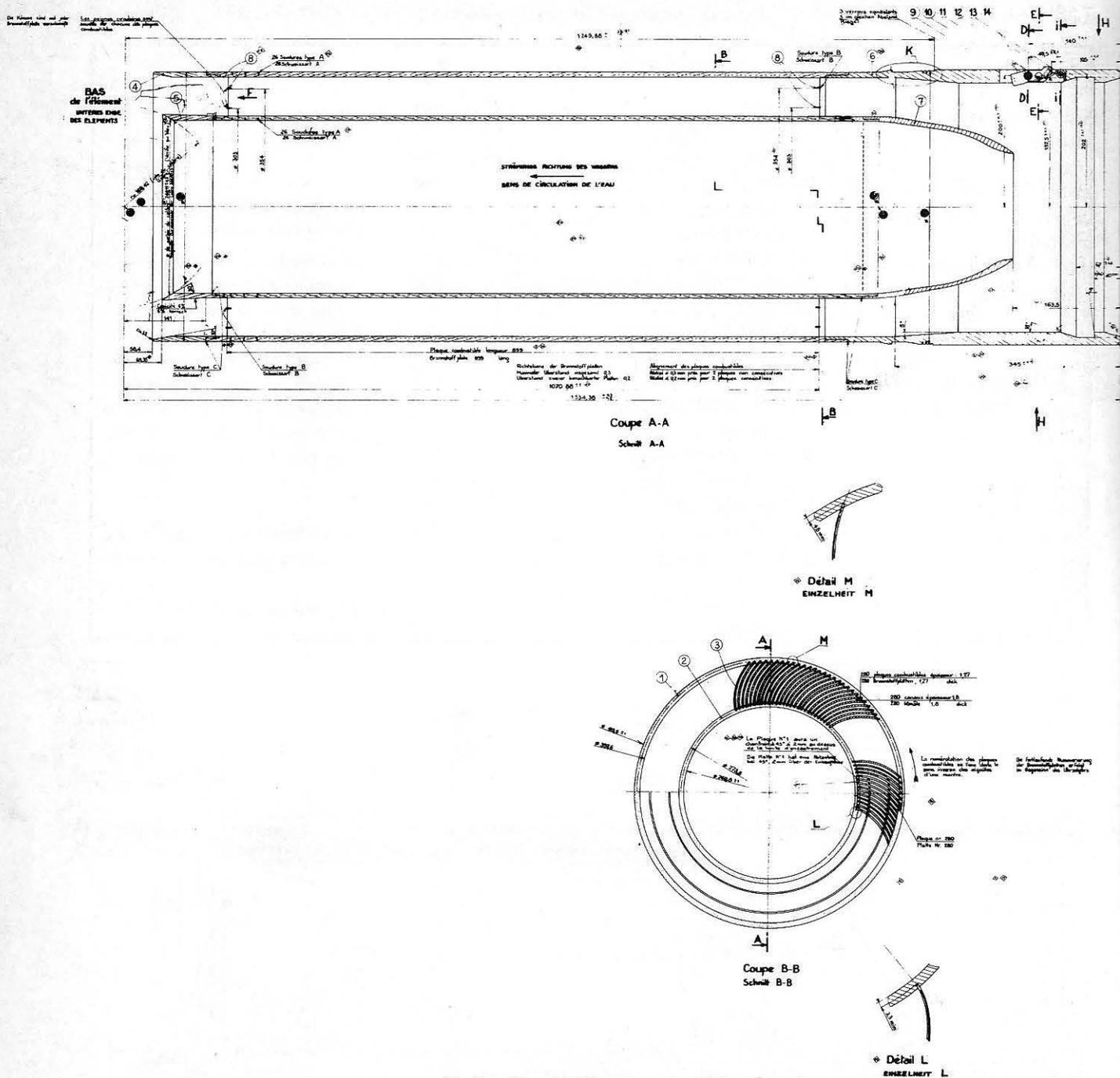


Fig. 3. — Plan de l'élément combustible

De nombreux contrôles doivent vérifier le respect des tolérances :

- Masse d'uranium 235 par plaque : $30,6 \text{ g} \pm 0,3$; masse d' U_{235} , localement sur une surface de diamètre 3 mm, comprise dans l'intervalle masse théorique $\pm 12 \%$; masse d' U_{235} dans un filet vertical de 3 mm de large inférieur à la masse théorique + 3 % (limitation de la puissance du filet chaud).

La masse d' U_{235} dans le noyau est contrôlée par comptage γ , les dimensions sont contrôlées par radiographie puis l'homogénéité par photométrie ou absorption de rayons X.

- Masse de bore 10 : $10,3 \text{ mg} \pm 0,2$; masse de B_{10} dans tout carré de 10 mm de côté comprise dans l'intervalle masse théorique $\pm 15 \%$. La masse de B_{10} est mesurée par contrôle destructif sur échantillon, l'homogénéité contrôlée par neutrographie.
- Le collage gaine-âme et l'absence de soufflure sont contrôlés par examen aux ultra-sons.
- L'épaisseur des canaux est $1,8 \text{ mm} \pm 0,25$. La moyenne transversale, moyenne des quatre pistes de contrôle, doit, à chaque cote, être maintenue dans l'intervalle $1,8 \text{ mm} \pm 0,15$. La moyenne longitudinale, moyenne d'une piste sur la hauteur du canal doit également être maintenue dans l'intervalle 1,8 mm

PLAQUE AVANT CINTRAGE
PLATTE VOR DEM BIEGEN

PLAQUE APRES CINTRAGE
PLATTE NACH DEM BIEGEN

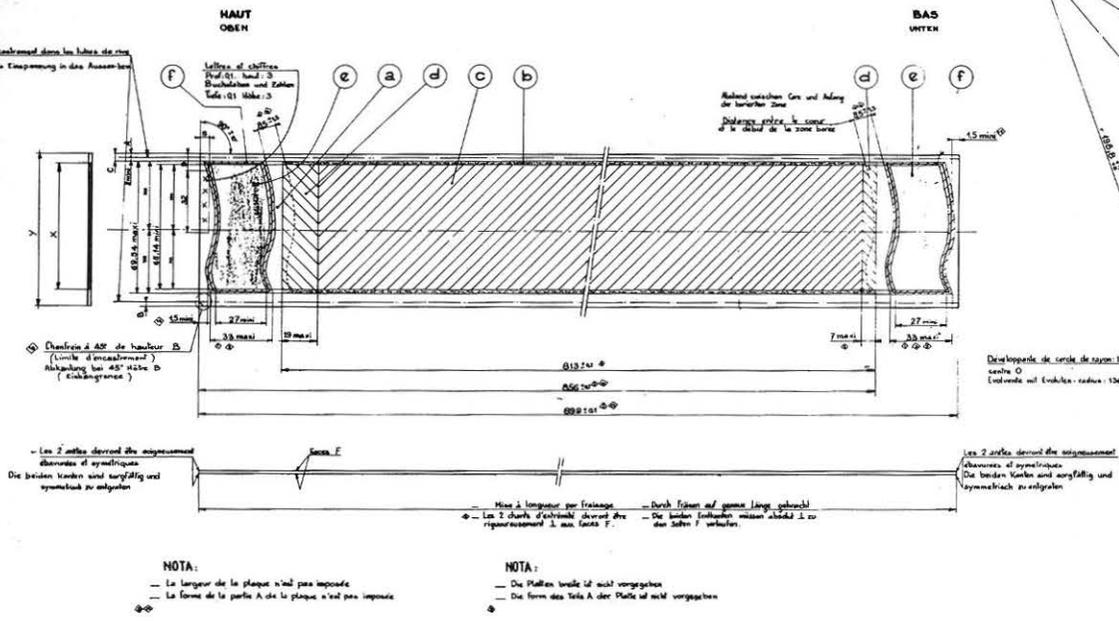


Fig. 4. - Plan de la plaque combustible

$\pm 0,15$ (ces tolérances reflètent l'aspect global, pour un filet, du danger thermodynamique).

— Les cotes générales de l'élément par rapport au bloc pile sont vérifiées à l'aide d'un gabarit.

La mesure est effectuée le long de chaque canal, sur quatre pistes, par des jauges extensométriques.

Barre de sécurité Ag In Cd

Les cinq barres de sécurité sont en alliage Ag In Cd : 80 % Ag, 15 % In, 5 % Cd. Leur diamètre extérieur est 100 mm, leur épaisseur 4 mm et leur longueur 2 000 mm (Figure 5). En position haute, leur extrémité basse se trouve à 400 mm au-dessus du niveau supérieur de l'uranium.

— La qualité de la liaison plaques-viroles est assurée par un contrôle total par ultra-sons des cinquante cordons. On s'assure en outre de la fidélité des conditions de soudage.

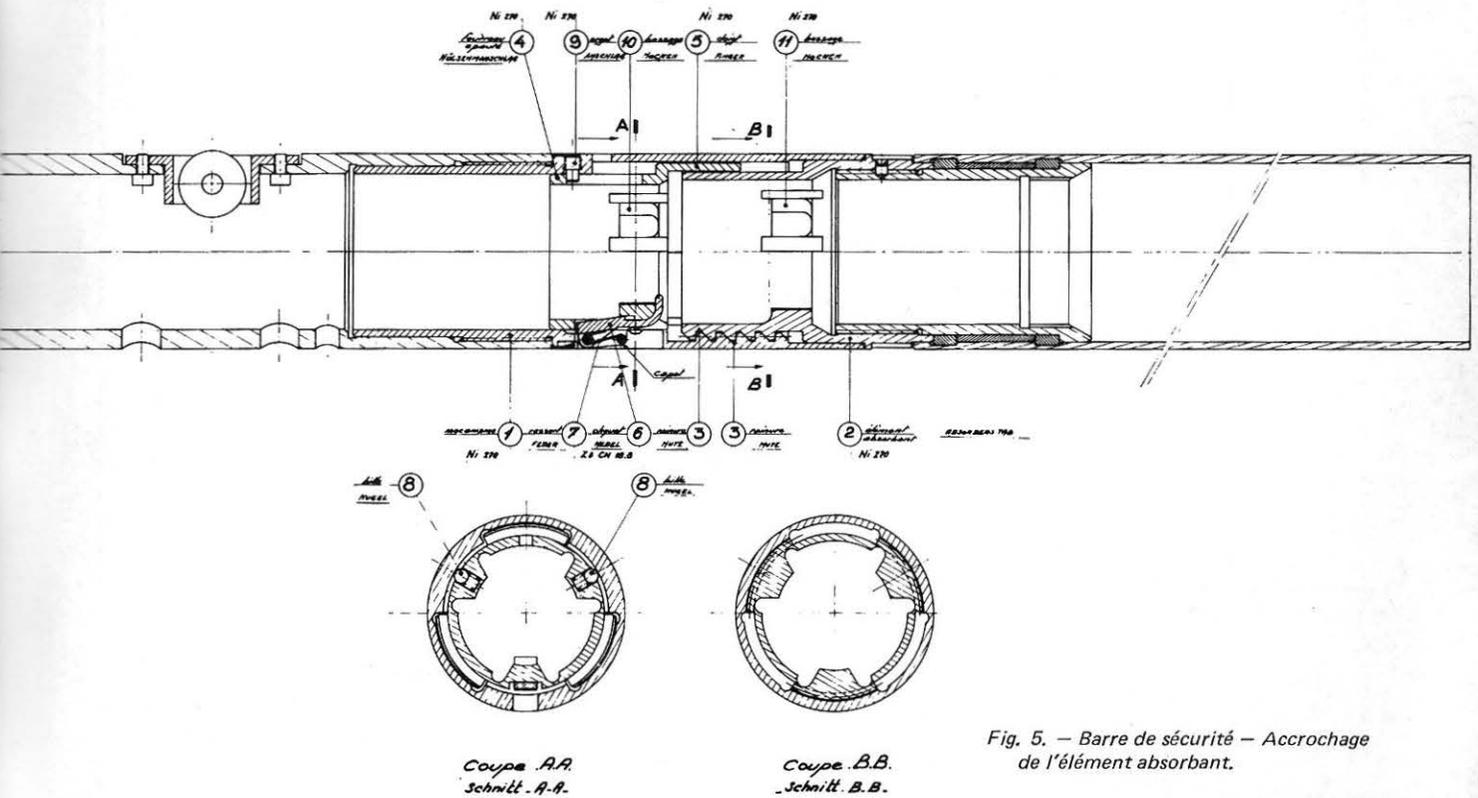


Fig. 5. - Barre de sécurité - Accrochage de l'élément absorbant.

Fonctionnement neutronique du coeur

Le fonctionnement neutronique du coeur est retracé de façon imagée sur la figure 6. L'histoire de 100 neutrons de fission y est schématisée en espace et en

énergie. On y voit que 68 neutrons se thermalisent dans le réflecteur ; il y produisent un flux dont le maximum est à 15 cm du coeur. C'est dans cette région qu'aboutissent les nez de canaux. Le flux de neutrons rapides d'énergie supérieure à 0,8 MeV est égal à 10^{13} n cm⁻² s⁻¹,

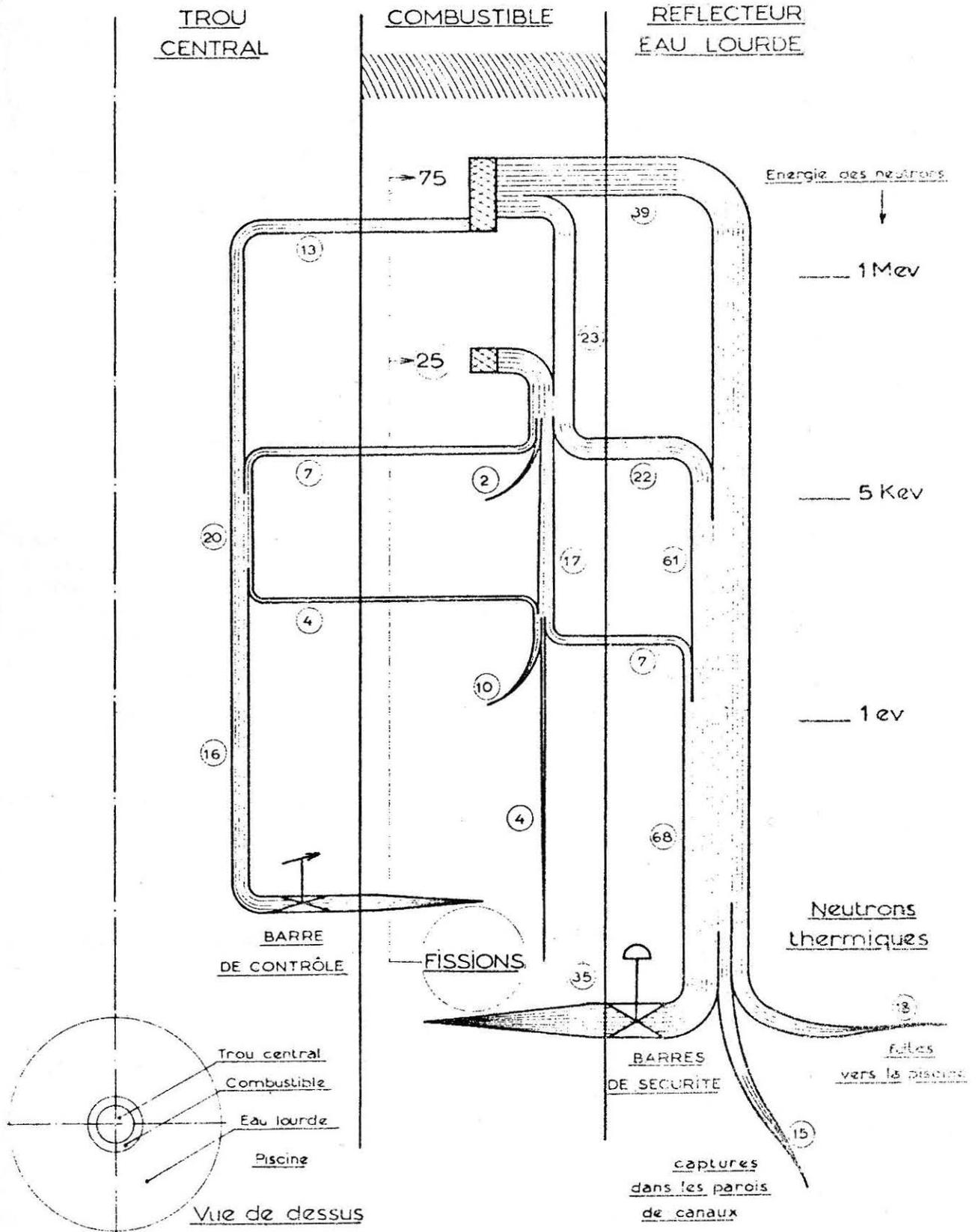


Fig. 6. — Fonctionnement neutronique du coeur

contre 4.10^{14} n cm⁻² s⁻¹ dans le coeur et l'échauffement γ est de 2 W/g contre 15 W/g dans le coeur : pour limiter la contribution de ces courants parasites dans le faisceau extrait, les canaux sont en outre orientés de façon à ne pas "voir" le coeur (le gain ainsi réalisé sur le flux rapide est d'un facteur 10). Les 16 neutrons ralentis dans la zone centrale provoquent 25 % des fissions. La barre absorbante placée dans cette zone permet donc de contrôler 17 % de réactivité, sans grande perturbation sur le réflecteur. Les 5 barres absorbantes placées autour du

coeur dans le réflecteur auront une grande efficacité (30 % de réactivité). C'est la position idéale pour les barres de sécurité.

On remarque enfin que la presque totalité des fissions provient des neutrons thermalisés à l'extérieur du coeur. Leur densité est maximale sur les frontières, avec une répartition à peu près symétrique (puissance maximum/ puissance moyenne radialement = 1,95).

TABLEAU II Performances du Réacteur

Flux de neutrons (n.cm⁻² s⁻¹)			
thermique	maximal dans le réflecteur non perturbé		1,5.10 ¹⁵
E < 0,625 eV	moyen dans le combustible		2,2.10 ¹⁴
	moyen dans le réflecteur D ₂ O		1,8.10 ¹⁴
rapide	maximal sur la virole externe		3,5.10 ¹⁴
E > 0,821 MeV	maximal sur la barre de contrôle		2,7.10 ¹⁴
Puissances (MW)			
<i>Puissance totale nominale</i>		57	
Puissance dans l'élément combustible			53
Puissance dans la barre de contrôle et le trou central			1,2
Puissance dans le réflecteur			3,2
Puissance dans la piscine			0,6
<i>Puissance de "scram"</i>		62,7	
<i>Puissance minimale de redistribution</i>		87	
Flux de chaleur (W/cm²)		Puissance spécifique (MW/dm³)	
moyen	174	moyenne	1,15
moyen dans le filet chaud	364	moyenne filet chaud	2,4
maximal au point chaud	500	moyenne point chaud	3,3
Refroidissement			
Débit à travers l'élément combustible	2 010 m ³ /h	Vitesse entre plaques	15,5 m/s
Débit à travers la barre de contrôle	50 m ³ /h	Vitesse dans les espaces annulaires	1 m/s
Fuite entre l'élément et la cheminée	40 m ³ /h		
Pression dans le plan médian du réflecteur		:	4 bars
Pression statique à la sortie de l'élément combustible		:	4,35 bars
Pression statique à l'entrée de l'élément combustible		:	14 bars
Température (° C.)			
Entrée dans l'élément combustible	30	entrée secondaire	13
Sortie du bidon réflecteur	51		
Moyenne à la sortie des plaques	49,5		
Maximale à la sortie du filet chaud	91,5		
Maximale à la surface des plaques	147		

Réactivité (p.c.m.)

Coeur à 20°C. avec bore et dispositifs expérimentaux, sans barre de pilotage et barres de sécurité en position haute	14 200
Réactivité des dispositifs expérimentaux	- 4 650
Réactivité du bore 10	- 4 500
Réactivité de la barre de pilotage	- 17 300
Efficacité différentielle maximale pcm/cm	275
Réactivité des 5 barres de sécurité :	
. barre de pilotage sortie	- 28 800
. barre de pilotage haute	- 35 100
Coefficient de vide (pcm/cm ³ de vide)	- 0,3
Proportion effective des neutrons retardés β eff.	710
Temps de vie des neutrons prompts (μ s)	650
Facteur d'aplatissement radial	1,95
Facteur d'aplatissement axial	1,20

Cycle

Longueur du cycle (jour)	36
Taux de combustion moyen (% U ₂₃₅ brûlé)	30
Taux de combustion maximal (% U ₂₃₅ brûlé)	60
Densité de fission maximale (fission/cm ³ d'âme)	1,4.10 ²¹
Epaisseur maximale d'oxyde à la surface des plaques (μ)	15
Température maximale de l'âme durant le cycle (°C.)	160

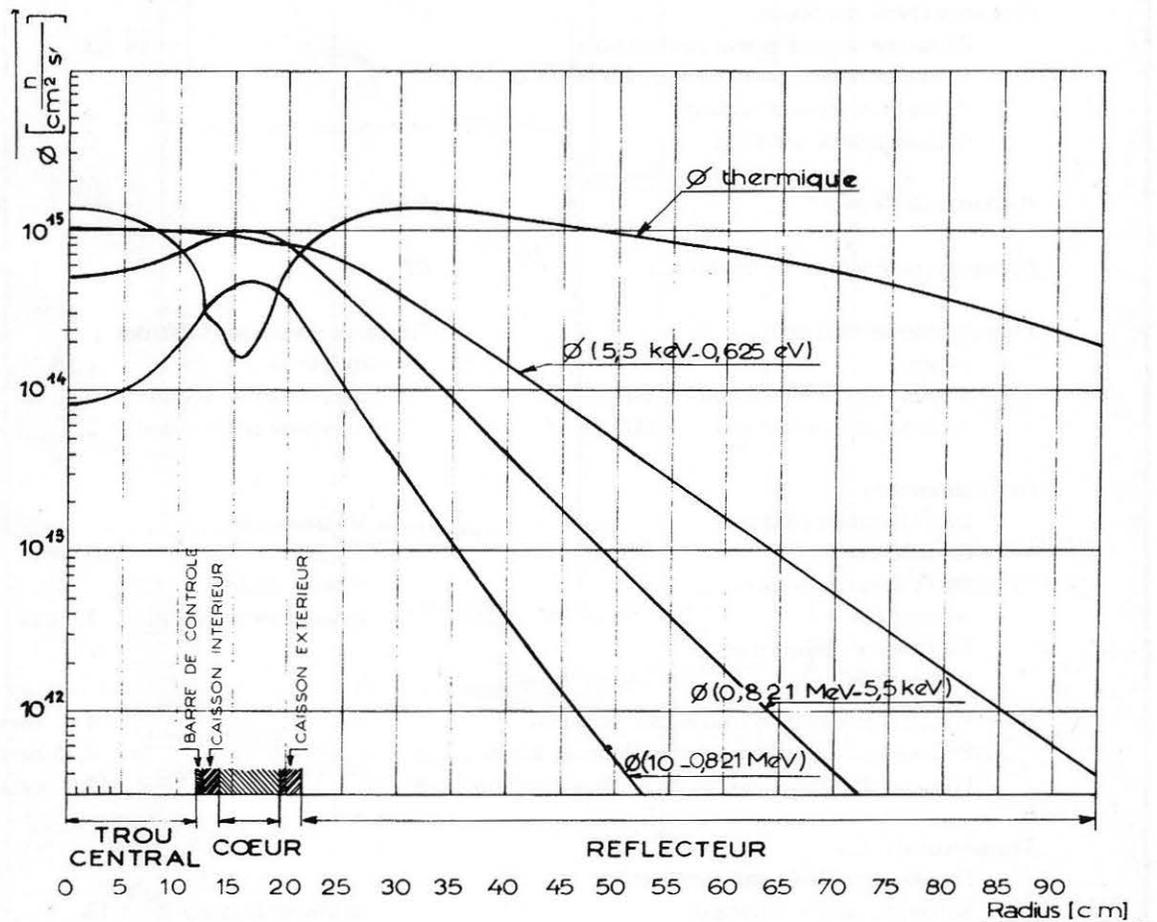


Fig. 7. - Courbes de flux dans le plan médian du coeur

Les performances sont précisées par plusieurs courbes jointes :

– Répartition du flux dans le plan médian du coeur (Figure 7).

– Courbe de réactivité de la barre de pilotage (Figure 8)

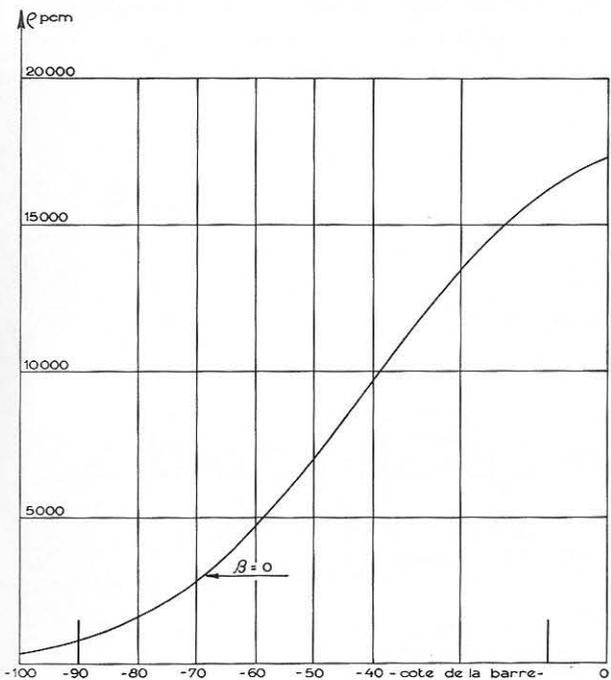


Fig. 8. – Efficacité de la barre de contrôle

– Injection de réactivité par la chute de 4 barres de sécurité (Figure 9).

– Evolution de la réactivité (Figure 10).

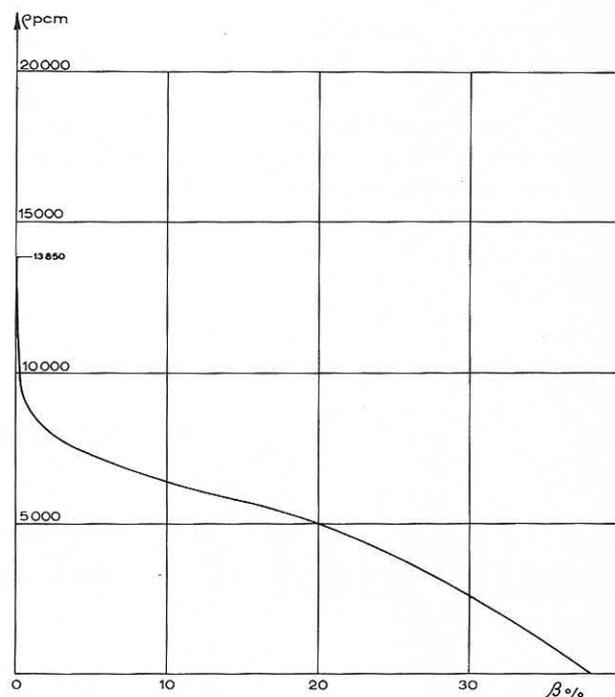


Fig. 10. – Evolution de la réactivité au cours du cycle.

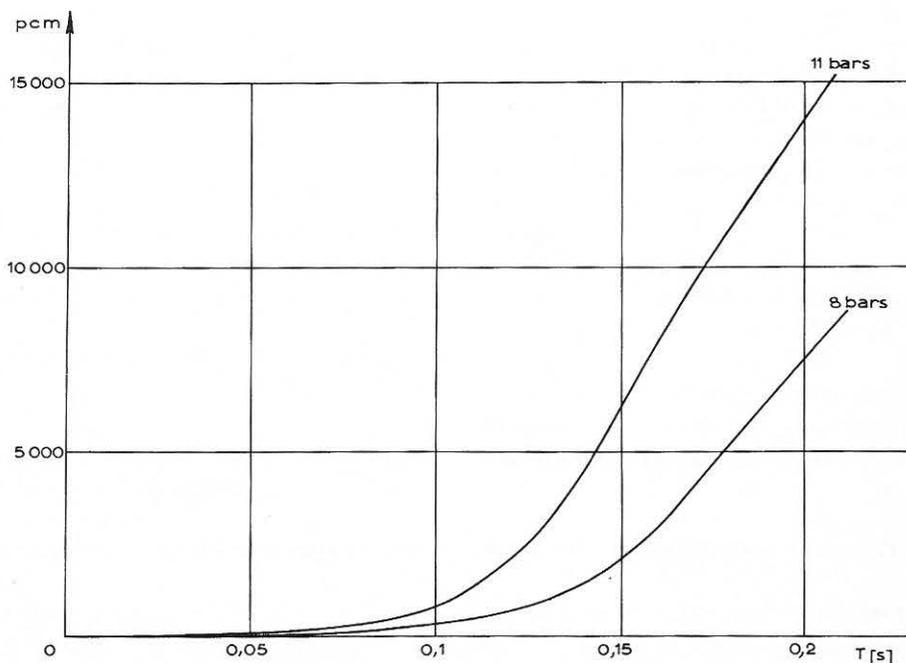


Fig. 9. – Antiréactivité des 4 barres de sécurité en fonction de leur temps de chute (Barre de pilotage sortie)

IV. - FONCTIONNEMENT

Les mesures effectuées à basse puissance concernant la cote critique, l'efficacité de la barre de contrôle et des barres de sécurité ont fourni les résultats prévus.

31 août 1971 : divergence

21 décembre 1971 : 57 MW

La divergence du réacteur le 31 août 1971, puis sa montée à la puissance nominale le 21 décembre, ont permis de donner au réacteur son "certificat de conformité".

Le fonctionnement à 57 MW s'est déroulé sans incident. Les mesures effectuées durant les paliers à puissance intermédiaire, comme à pleine puissance, ont donné des résultats conformes en radio-protection comme en ce qui concerne le bilan thermique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Rapport Technique Commun C. E. A. - G. F. K. sur les avantages comparés d'un refroidissement à eau ordinaire ou à eau lourde pour le Réacteur à Haut Flux - (juillet 1966).
- [2] H.G. ECKERT ; K. SCHARMER ; FOEHN, l'expérience critique pour le Réacteur à Haut Flux franco-allemand I. L. L. - (juillet 1971).
- [3] J. BLANCHET ; L. GRALL Corrosion par l'eau à 170° C. et 210° C. d'alliage d'aluminium à propriétés mécaniques améliorées, utilisables pour le Réacteur à Haut Flux - (juillet 1968).
- [4] S. FABREGA : Le calcul thermique des réacteurs de recherche refroidis par eau. Rapport CEA R 4114 - (mars 1971).