

PRÉSIDENCE DU CONSEIL
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Systeme uranium naturel-graphite

par

A. P. SCHMITT, P. TANGUY, A. TESTE du BAILLER et C. P. ZALESKI

Rapport CEA n° **968**

1958

CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY
SERVICE DE DOCUMENTATION
Boite postale n° 2 - Gif-sur-Yvette (S.-et-O.)

SCHMITT A. P., TANGUY P., TESTE DU BAILLER A., ZALESKI C. P.

Rapport CEA n° 968

Expériences critiques sur le réacteur G1.

Sommaire. — Le démarrage des réacteurs G1 (1956) et G2 (1958) de Marcoule nous a permis d'effectuer une série d'expériences tant sur les réseaux de ces piles que sur des réseaux différents (éléments tubulaires ou divisés, réseaux sous-modérés, etc...).

Dans une première partie, nous donnons une description détaillée des deux réacteurs. Dans la deuxième partie, relative aux mesures de laplaciens, nous décrivons d'abord les mesures absolues de laplaciens (cartes de flux), puis les mesures relatives effectuées par la méthode originale de remplacement progressif. Les résultats expérimentaux sont rassemblés dans le tableau VI. Dans la troisième partie, nous rappelons un certain nombre d'autres mesures effectuées sur G1.

1958

21 pages

SCHMITT A. P., TANGUY P., TESTE DU BAILLER A., ZALESKI C. P.

Report CEA n° 968

Critical experiments on the G1 reactor.

Summary. — A number of experiments have been performed during the start up period of the G1 (1956) and G2 (1958) reactors in Marcoule, both on their lattices and on different lattices (hollow rods, clusters, undermoderated lattices).

The first chapter gives a thorough description of the two reactors. The second chapter deals with buckling measurements, both absolute (flux plots) and relative by the method of progressive substitution. The experimental results are summarised in Table VI. The third chapter contains a number of other measurements performed on G1.

1958

21 pages

RAPPORT C.E.A. n° 968

(CONF.15/P/1191)

RESEAUX URANIUM NATUREL-GRAPHITE

par

A.P. SCHMITT , P. TANGUY

A. TESTE DU BAILLER , C.P. ZALESKI

1) Remarque :

Il convient de remarquer que le présent rapport ne représente pas le sujet de la communication présentée à Genève sous le numéro P/1191.

On ne trouvera ici que la partie relative aux expériences critiques sur le réacteur G1, partie rédigée avant la conférence. Entre cette rédaction et l'ouverture de cette conférence, nous avons effectué les expériences critiques sur le réacteur G2, qui ont été présentées oralement à Genève.

Un rapport écrit après ces expériences a été rédigé en un nombre très restreint d'exemplaires avec la référence P/1191. Une rédaction plus complète, relative à G2 et G3 doit être entreprise prochainement.

2) Erratum

Page 9, dans le tableau, 2^e colonne, première ligne, ajouter AB^2

RESEAUX URANIUM NATUREL - GRAPHITE

par

A.P. SCHMITT (1) P. TANGUY (2)

A. TESTE DU BAILLER (2) C.P. ZALESKI (1)

EXPERIENCES CRITIQUES SUR LE REACTEUR G I

SOMMAIRE

La période d'essais préparatoires à la mise en service du réacteur GI de Marcoule a permis d'effectuer quelques expériences de physique neutronique. Ces expériences peuvent être classées comme suit :

1- Mesure de la longueur de diffusion du graphite utilisé. Cette mesure permet de contrôler la qualité des graphites destinés aux réacteurs prévus dans le programme du C.E.A. et les effets de canaux d'air dans le graphite (anisotropie).

2 - Détermination de tailles critiques de la pile non empoisonnée ou uniformément empoisonnée par du thorium.

3- Mesures de distributions de flux sur la pile critique, permettant de connaître le laplacien matière du réseau, ainsi que quelques points particuliers (anisotropie - économie de réflecteur).

4- Expériences de substitution, permettant de mesurer la variation du laplacien matière du réseau avec le diamètre de l'uranium.

5- Mesures fines dans une cellule (facteur anti-trappe, facteur d'utilisation thermique).

(1) Commissariat à l'Energie Atomique - Service de Neutronique Expérimentale

(2) Commissariat à l'Energie Atomique - Service de Physique Mathématique.

DESCRIPTION DU MILIEU ACTIF

I - EMPILEMENT DE GRAPHITE -

C'est un cylindre à axe horizontal de 8,840 mètres de longueur. La section est de forme octogonale comme l'indique la figure I -

Le milieu multiplicateur est un réseau carré de cellules dont le pas est de 20 cm (distance entre axes de deux canaux voisins). Au centre de chaque cellule, un canal cylindrique de 7 cm de diamètre est destiné à recevoir les cartouches d'Uranium et à permettre le passage de l'air de refroidissement.

Il y a 1337 cellules formant au total un cylindre multiplicateur d'un diamètre moyen de 8,225 mètres. Le réflecteur de graphite a une épaisseur radiale moyenne de 0,75 mètre et une épaisseur axiale de 0,62 mètre.

La pile chargée complètement (1337 canaux) comporte 100 tonnes d'uranium environ. Beaucoup d'expériences ont été faites avec un chargement incomplet.

L'empilement est traversé en son milieu par une fente verticale de 8 cm d'épaisseur servant à l'entrée de l'air froid au centre de la pile. L'air sort en refroidissant l'uranium par les deux demi-canaux de chaque côté de la fente.

Certaines expériences à faible puissance ont été faites en ne chargeant la pile que d'un seul côté de la fente; cette disposition a été appelée "pile plate" (diamètre de la zone chargée supérieur à la longueur), par opposition à la "pile longue" correspondant à un chargement des deux côtés de la fente.

La qualité du graphite n'est pas homogène dans toute la pile. Le meilleur a été placé au centre dans un cylindre coaxial à l'empilement et d'un diamètre de 4 mètres environ. Les caractéristiques sont les suivantes :

	<u>Zone centrale</u>	<u>Zone expériéure</u>
Densité :	$1,61 \pm 0,015$	$1,59 \pm 0,02$ g/cm ³
Capture relative :	$3,85 \pm 0,15$	$3,9 \pm 0,2$ mb/noyau

La capture du graphite (azote déduit) fournie ci-dessus est la moyenne des mesures d'oscillations faites sur des échantillons, et n'est à considérer qu'en valeur relative. On trouvera plus loin les résultats de mesures de longueur de diffusion pour la zone centrale.

2 - CARTOUCHES D'URANIUM -

Il y a deux cartouches d'uranium dans chaque canal, une de chaque côté de la fente. 37 billettes d'uranium d'un poids de $1,000 \pm 0,006$ Kg. chacune sont contenues dans une gaine de magnésium. La barre d'uranium a une longueur de $3,720 \pm 5$ mm, un diamètre de $26 \pm 0,2$ mm et pèse $37,00 \pm 0,06$ Kg. La densité du métal est de 19,0, mais si l'on admet les dimensions et poids ci-dessus, la densité apparente est un peu plus faible.

Chaque ailette a une longueur transversale de $16,3 \pm 0,6$ mm. Une section droite de la cartouche comporte une aile de magnésium de 368 mm²; le poids de la gaine

t des ailles est de 2.380 g., poids auquel il faut ajouter 73 g. pour les embouts de magnésium qui terminent la cartouche.

La section efficace de capture du magnésium, mesurée par oscillation, est de : 63 ± 6 mb par noyau.

La figure 2, donne le positionnement de la cartouche d'uranium dans le canal de la pile. La cartouche peut être poussée à fond vers la fente (cas de la marche normale en puissance), elle peut être aussi légèrement retirée pour un positionnement plus précis; cette position a été utilisée pour toutes les expériences à faible puissance.

A - EXPERIENCES SUR LE GRAPHITE

On a profité de ce que l'empilement était beaucoup plus gros que le volume nécessaire pour rendre la pile critique à la température ambiante et en l'absence d'empoisonnement, pour étudier la diffusion dans le graphite périphérique des neutrons émis par le réseau multiplicateur. La diffusion a été observée non seulement sur le bloc de graphite percé de canaux dans des directions parallèle et perpendiculaire à l'axe de ceux-ci, mais aussi sur un graphite "plein" après que les canaux aient été bouchés par des cylindres taillés dans du graphite de même qualité. (figure 3).

I - LONGUEUR DE DIFFUSION DU GRAPHITE "PLEIN"

Elle a été mesurée dans le graphite de la région centrale de densité $1,61 \text{ g/cm}^3$. On étudie la diffusion, dans une demi-pile, des neutrons émis par l'autre demi-pile chargée d'uranium. On a trouvé :

$$L_t = 52,7 \pm 0,4 \text{ cm.}$$

Après correction pour se rapporter à la densité standard de $1,60 \text{ g/cm}^3$ la longueur de diffusion du graphite à la température de 17° C a été trouvée égale à :

$$L^s = 53,0 \pm 0,4 \text{ cm.}$$

L'intérêt de cette mesure est d'être précise et de permettre d'atteindre la valeur absolue de la capture du graphite, pourvu que l'on connaisse le libre parcours moyen de transport λ_t . En fonction des grandeurs L et λ_t relatives à la densité $\rho = 1,60 \text{ g/cm}^3$, la section efficace de capture σ_a du graphite pour la vitesse des neutrons de 2.200 m/s est donnée par l'expression :

$$\sigma_a = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{A \lambda_t}{N_0 \rho L_t^2}$$

N est le nombre d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$

A est la masse atomique du graphite = 12,01

La mesure de λ_t faite à Saclay (1) a donné pour $\rho = 1,60$:

$$\lambda_t = 2,53 \pm 0,03 \text{ cm.}$$

Cette valeur doit être rapprochée de celle donnée antérieurement (2), et aussi des valeurs étrangères communiquées dans d'autres publications. (3) La comparaison de ces résultats nous a conduits à adopter une valeur "moyenne" :

$$\lambda_t = 2,54 \text{ cm. } \pm 0,03$$

En adoptant cette dernière valeur, on trouve pour la section efficace de capture de G I le résultat suivant :

$$\sigma_a = 4,25 \pm 0,10 \text{ mb}$$

en y comprenant la capture de l'azote occlus dans les pores du graphite qui représente :

$$\delta \sigma_a = 0,26 \pm 0,02 \text{ mb}$$

Ce résultat permet d'autre part, d'étalonner en valeur absolue, la méthode d'oscillation utilisée sur un lot de barres de graphite de G I .

2 - EFFET D'ANISOTROPIE DES CANAUX SUR LA DIFFUSION DANS LE BLOC DE GRAPHITE -

Lorsque les canaux sont vides, la diffusion des neutrons est anisotrope et caractérisée par deux valeurs de la longueur de diffusion relatives aux directions perpendiculaire et parallèle aux axes des canaux. Nous les appellerons L_t^{\perp} et L_t^{\parallel} . Si ϕ est le flux de neutrons thermiques, l'équation de diffusion dans le graphite troué, peut s'écrire, en coordonnées cylindriques.

$$\left[(L_t^{\parallel})^2 \frac{d^2}{dz^2} + (L_t^{\perp})^2 \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) - 1 \right] \phi = 0$$

Deux expériences (études de distributions de flux par irradiation de détecteurs) ont conduit aux valeurs suivantes :

$$L_t^{\perp} = 62,2 \pm 1 \text{ cm.}$$

$$L_t^{\parallel} = 64,6 \pm 0,65 \text{ cm.}$$

Le rapport de chacune de ces valeurs avec celle relative au graphite "plein"

$$L_t^0 = 52,7 \pm 0,4 \text{ cm. ,}$$

a été comparé avec ce que fournit l'application numérique de la théorie de Behrens⁽⁴⁾ L'accord est très convenable comme le montre le tableau ci-dessous :

	EXPERIENCE	THEORIE de BEHRENS
$\left(\frac{L_t^{\parallel}}{L_t^0} \right)^2$	$1,504 \pm 0,040$	1,494
$\left(\frac{L_t^{\perp}}{L_t^0} \right)^2$	$1,393 \pm 0,045$	1,353
$\left(\frac{L_t^{\parallel}}{L_t^{\perp}} \right)^2$	$1,08 \pm 0,03$	1,104

B - MESURE DE GRANDEURS MACROSCOPIQUES DU RESEAU

Les expériences de ce type sont celles qui fournissent immédiatement des renseignements du plus haut intérêt pratique avec le minimum d'incertitudes d'interprétation.

La comparaison de tailles critiques et de laplaciens obtenus dans des conditions différentes permet d'atteindre la valeur de certaines grandeurs de première importance pour la neutronique des piles : anisotropie et variation du laplacien en fonction du diamètre de l'uranium pour un réseau donné. Enfin elles permettent d'ajuster un jeu de formules qui, bien qu'imprécises dans le détail, rendent possible, pour des piles semblables, la prévision correcte de résultats globaux, comme la masse critique, avec une précision meilleure que celle des effets individuels (facteurs de multiplication par exemple).

I - TAILLES CRITIQUES -

- PILE A URANIUM SEUL :

	Nombre de canaux chargés	Masse critique d'uranium
Pile "plate"	$508 \pm 0,4$	$18,8 \pm 0,015 \text{ T}$
Pile "longue"	$329 \pm 0,3$	$24,3 \pm 0,025 \text{ T}$

Ces résultats sont à rapprocher de ceux donnés dans un calcul de prévision fait en 1955 par comparaison des tailles critiques de piles étrangères analogues (5) :

Pile plate	19 ± 3 tonnes
Pile longue	26 ± 4 tonnes

- PILE A URANIUM ET THORIUM :

Le réacteur GI disposant, même à chaud, d'un excès de réactivité important, il a été nécessaire de compenser cet excès par l'introduction d'absorbants. On a choisi de résoudre le problème en utilisant une matière fertile, le thorium, qui se présente sous la forme de cartouches identiques aux cartouches d'uranium (dimensions, gaines).

La détermination de tailles critiques de piles chargées d'une façon régulière avec de l'uranium et du thorium, a été effectuée en fonction de la concentration "volumétrique" T en thorium (fraction du nombre de canaux chargés en thorium au nombre total de canaux chargés).

A partir de ces mesures, basées essentiellement sur le principe de l'approche sous-critique, on a déterminé les laplaciens critiques radiaux $\left\{ B^2 = \frac{k^2}{R_0^2} \right\}$ en fonction de T . Ces résultats, fournis en figure 4, ont été retrouvés avec une précision convenable par un calcul relativement simple (6) : on étudie une "super cellule" formée d'un canal de thorium central entouré d'un certain nombre de canaux d'uranium $\left(\frac{1}{T} - 1 \right)$. Pour calculer les quantités, ξ , η , ρ , f , L_t^2 et L_c^2 de cette super cellule, on remplace la cellule élémentaire de thorium et le milieu multiplicateur qui

l'entoure par des milieux homogènes équivalents. Ce mode de calcul suppose que les sources de neutrons thermiques sont à peu près uniformes dans la cellule et que les conditions de réflexion sur les bords sont vérifiées. Ces hypothèses ont reçu leur justification.

Le laplacien radial critique varie de manière sensiblement linéaire en fonction de la concentration T et l'extrapolation donne un laplacien radial critique nul pour :

$$T = 8,8 \pm 0,3 \%$$

Les résultats les plus précis ont été obtenus pour le chargement qui est celui définitif de GI : $T = 4 \%$. Le thorium est dans ce cas réparti dans les canaux suivant un réseau carré de 1 mètre de côté. Le chargement critique est de :

$$700 \pm 5 \text{ canaux}$$

2 - MESURES DE LAPLACIENS ; ANISOTROPIE DE RESEAUX

La diffusion des neutrons dans le réseau de GI est anisotrope par suite de la direction privilégiée des barres d'uranium et surtout à cause de la présence de gaines d'air qui forment des cavités autour des cartouches. Cette anisotropie peut être caractérisée par le rapport des aires de migration :

$$1 + \gamma = \frac{M_{\parallel}^2}{M_{\perp}^2}$$

avec les définitions suivantes :

	Parallèle aux canaux	Perpendiculaire aux canaux
Aire de diffusion	$(L_{\parallel}^{\prime\prime})^2$	$(L_{\perp}^{\prime\prime})^2$
Aire de ralentissement	$(L_{\parallel}^{\prime})^2$	$(L_{\perp}^{\prime})^2$
Aire de migration	$M_{\parallel}^2 = (L_{\parallel}^{\prime\prime})^2 + (L_{\parallel}^{\prime})^2$	$M_{\perp}^2 = (L_{\perp}^{\prime\prime})^2 + (L_{\perp}^{\prime})^2$

Nous définissons en outre l'aire de migration moyenne par :

$$\bar{M}^2 = \frac{1}{3} (2M_{\perp}^2 + M_{\parallel}^2)$$

A cette aire de migration moyenne est associé un laplacien critique que nous appellerons laplacien matière du réseau GI : B_m^2 .

Si α_i^2 et β_i^2 sont les contributions radiale et axiale du laplacien géométrique

(c' est à dire les quantités $\frac{j^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{H^2}$) pour les chargements $i = 1$ ou 2 , l'anisotropie γ et le laplacien B_m^2 sont fournis par les expressions :

$$\alpha_i^2 M_{\perp}^2 + \beta_i^2 M_{\parallel}^2 = B_m^2 \bar{M}^2 \quad i = 1 \text{ ou } 2$$

$$1 + \gamma = \frac{\alpha_1^2 - \alpha_2^2}{\beta_1^2 - \beta_2^2}$$

$$B_m^2 = \alpha_i^2 \left(1 - \frac{\gamma}{3}\right) + \beta_i^2 \left(1 + \frac{2\gamma}{3}\right) + \epsilon(\gamma^2).$$

Pour atteindre γ , il faut donc au minimum deux géométries différentes. L'intérêt de cette mesure tient au fait que l'anisotropie d'un réseau est théoriquement mal connue. Par contre une détermination expérimentale précise est très délicate; il faut en effet que les quantités $\alpha_1^2 - \alpha_2^2$ et $\beta_1^2 - \beta_2^2$ soient aussi grandes que possible. Nous avons réalisé à GI, 3 empilements de forme géométrique simple, sur lesquels nous avons étudié soigneusement les distributions de flux (par irradiation de détecteurs ponctuels), et dénommés : pile plate, pile longue et "pile bouteille".

L'expérience de la "pile bouteille" consiste à irradier un réseau nettement sous-critique situé dans une demi-pile, à partir des neutrons émis par l'autre demi-pile, chargée de manière que l'ensemble soit critique. En remplaçant dans le cylindre étroit (figure 5) la distribution axiale sinusoidale par une courbe exponentielle, on accroît le phénomène d'anisotropie, et on améliore sa détermination.

Pour éliminer les modes harmoniques dans la distribution, et pour minimiser l'effet perturbateur du réflecteur sur la répartition spectrale des neutrons, le réseau d'uranium est protégé par une cage de cadmium qui a été dénommée "cage de Faraday".

Les résultats obtenus sont les suivants :

	α_i^2	β_i^2	$\alpha_i^2 + \beta_i^2$ en m^{-2}
Pile plate	$0,587 \pm 0,011$	$0,446 \pm 0,007$	$1,033 \pm 0,013$
Pile longue	$0,818 \pm 0,009$	$0,229 \pm 0,007$	$1,047 \pm 0,012$
Pile bouteille	$2,015 \pm 0,012$	$0,915 \pm 0,013$	$1,100 \pm 0,018$

On en déduit :

$$\begin{array}{l} : \\ : \\ : \\ : \end{array} \left\{ \begin{array}{l} B_m^2 = 1,04 \pm 0,01 \text{ m}^{-2} \\ \gamma = 0,048 \pm 0,017 \end{array} \right. \begin{array}{l} : \\ : \\ : \\ : \end{array}$$

Nous avons comparé la valeur de γ ci-dessus avec celle calculée à partir de la théorie de Bahrens bien que celle-ci ne soit pas exactement applicable (présence des ailettes par exemple). Le calcul a fourni un accord excellent : $\gamma = 0,051$

DIMENSIONS CRITIQUES ET ECONOMIE DE REFLECTEUR .

Le tableau ci-après fournit les valeurs de ces grandeurs extraites des distributions de flux mesurées. L'économie de réflecteur ainsi trouvée est en général en bon accord avec celle que l'on calcule en théorie à deux groupes.

Unités en cm.		Pile plate	Pile longue	Pile à U - Th
Rayon extrapolé	R	$313,8 \pm 2,6$	$265,8 \pm 2,2$	$362,9 \pm 5,7$
Economie réflecteur radial	Δ_r	$59,4 \pm 2,5$	$61,0 \pm 2,1$	$64,4 \pm 5,7$
Hauteur extrapolée	H	$470,3 \pm 3,1$	$657,0 \pm 9,7$	711 ± 15
Economie réflecteur axial				
côté fente	} Δ_z	$46,8 \pm 1,5$	$46,4 \pm 4,5$	$43,4 \pm 3,4$
côté extérieur		$51,5 \pm 1,6$		
Laplacien géométrique	B_m^2 m^{-2}	$1,033 \pm 0,013$	$1,047 \pm 0,012$	$0,610 \pm 0,015$

VARIATIONS DE LAPLACIEN EN FONCTION DU DIAMETRE DE L'URANIUM -

L'expérience a consisté à remplacer progressivement un certain nombre de cartouches (du chargement normal (ϕ 26 mm) d'uranium, par des cartouches de plus gros diamètres : 28 puis 32 mm. Le remplacement se fait couronne par couronne à partir du centre et la réactivité de la pile est mesurée à chaque étape.

Les résultats expérimentaux sont donnés en figure 6 - On définit le poids $W(R_1)$ correspondant à une région centrale de rayon R_1 par la relation :

$$W(R_1) = \frac{\int_0^{R_1} J_0^2\left(j \frac{\pi}{R}\right) r dr}{\int_0^R J_0^2\left(j \frac{\pi}{R}\right) r dr}$$

où $R_1 = b\sqrt{n}$, b rayon de la cellule = 11,3 cm, n nombre de canaux remplacés.

Si $\Delta\rho$ est la réactivité mesurée pour un chargement donné, on construit la courbe donnant $\Delta\rho/W(R_1)$ en fonction de $W(R_1)$.

De telles courbes tendent vers une valeur limite qui est le résultat recherché, c'est à dire la réactivité consécutive ou remplacement de toutes les cartouches de la pile ($W(R_1) = 1$).

Au moyen d'un calcul (7) basé sur une théorie à deux groupes, on détermine la forme analytique de ces courbes et on en déduit l'extrapolation des résultats expérimentaux jusqu'à la valeur $W(R_1) = 1$.

Certaines corrections (7) sont faites pour tenir compte de la légère modification des économies de réflecteur et de la variation des coefficients de diffusion avec l'épaisseur de la gaine d'air : la correction globale sur la variation de laplacien n'exède pas $0,005 \text{ m}^{-2}$ pour les cartouches $\phi 28$ et $0,012 \text{ m}^{-2}$ pour les cartouches $\phi 32$ mm.

Ces expériences ont été effectuées sur deux configurations de pile différentes (pile "plate" et pile "longue") pour lesquelles les effets des réflecteurs, et des coefficients de diffusion étaient sensiblement différents : malgré la perturbation apportée par la fente centrale, l'accord entre les deux séries d'expériences a été très satisfaisant, puisque les variations de laplacien obtenues n'ont différé, d'une série à l'autre, que de $0,002 \text{ m}^{-2}$ pour les cartouches $\phi 28$ et de $0,003 \text{ m}^{-2}$ pour les cartouches $\phi 32$ mm.

Les résultats sont contenus dans le tableau suivant :

Variation du diamètre	:	:
de l'uranium .	:	:
$\phi 26$ à $\phi 28$ mm.	:	$+ 0,065 \pm 0,004 \text{ m}^{-2}$
$\phi 26$ à $\phi 32$ mm.	:	$+ 0,080 \pm 0,008 \text{ m}^{-2}$

(figure 6).

L'intérêt de cette expérience réside dans le fait que pour obtenir une très bonne valeur de la variation de laplacien, il suffit de disposer de moins d'un dixième du chargement critique complet. Dans le cas du réacteur GI, il a suffi de 40 cartouches modifiées pour un chargement normal de 500 cartouches. En outre l'expérience ne nécessite que des mesures cinétiques (mesures du temps de doublement de la puissance).

C - MESURE DE GRANDEURS MICROSCOPIQUES DU RESEAU (10)

Le facteur d'utilisation thermique f de la cellule de GI a été obtenu en mesurant la distribution du flux de neutrons thermiques à l'intérieur de la cellule centrale par une méthode d'autoradiographie de détecteurs irradiés.

L'expérience a donné pour le réseau normal de GI :

$$\bar{f} = 0,895 \pm 0,005$$

Cette valeur est en excellent accord avec la valeur calculée à l'aide d'une théorie récemment élaborée (8) :

$$f = 0,8947 -$$

Une mesure analogue effectuée dans une cellule de thorium a permis d'atteindre, dans le cas du chargement normal de GI (T = 4%) le rapport des flux moyens dans le thorium et dans l'uranium :

$$\frac{\phi_{th}}{\phi_u} = 1,21 \pm 0,05$$

Le facteur antitrappe a été obtenu par des mesures de l'absorption résonnante des cartouches de 26 et 32 mm. du réseau de GI. Les résultats sont les suivants :

Diamètre de l'uranium	26 mm.	32 mm.
Facteur p	0,912 ± 0,006	0,884 ± 0,010

D - INTERPRETATION DES RESULTATS - FORMULES DE CALCUL DE RESEAU

A partir de l'ensemble expérimental décrit ci-dessus, nous avons établi un jeu de formules permettant le calcul de réseaux à graphite et uranium naturel.

Le mode de calcul présenté ici est valable si l'on ne s'écarte pas trop des caractéristiques du réseau de GI (géométrie du calcul et des éléments combustibles, matériaux de gaine). On a choisi 1,60 pour la densité du graphite et 19 pour l'uranium

I - DEFINITION DES PARAMETRES GEOMETRIQUES

Rayon de l'uranium	a
Rayon du canal	c
Pas du réseau	b
Section équivalente de gaine	s
Epaisseur " "	e
Rayon équivalent de la cartouche	a' = a + e

2 - EFFET DES CANAUX D'AIR (Théorie de Behrens).

On définit l'anisotropie au moyen des quantités d_i qui représentent les rapports des coefficients de diffusion en présence et en l'absence de canaux .

$$d_i^{\perp} = 1 + \frac{c^2 - a'^2}{b^2} \left[1 + (c - a') \frac{F}{\lambda_i} \right]$$

$$d_i^{\parallel} = 1 + \frac{c^2 - a'^2}{b^2} \left[1 + 2(c - a') \frac{F}{\lambda_i} \right]$$

F est une fonction tabulée du rapport $\frac{a'}{c}$. Dans le cas du calcul de L_t^{\perp} et L_t^{\parallel} du graphite on a : $a' \approx a \approx 0$

λ_i est le libre parcours moyen de transport du modérateur pour le groupe d neutrons que l'on considère ($i = t$ pour le groupe thermique , $i = r$ pour le groupe en ralentissement).

3 - FORMULE A QUATRE FACTEURS POUR k_{∞}

$$k_{\infty} = \epsilon \eta \tau f$$

- $\eta = 1,292$

- $\tau = e^{-1/\tau}$ $\tau = \frac{b^2 - c^2}{a^2} \cdot \frac{\sum' \Sigma_{ms}}{I_{eff}}$

avec : $\sum' \Sigma_{ms} = 0,06 \text{ cm}^{-1}$ $I_{eff} = 0,240 \left(1 + 7 \cdot \frac{2}{19a} \right)$ en cm^{-1}

- $\epsilon = 1 + \frac{0,0952 P}{1 - 0,5208 P}$

P est une fonction tabulée de $\sigma' a$, σ' étant la section totale d l'uranium 238 .

- f s'exprime au moyen de :

$$\frac{1}{f} - 1 = R_1 + R_2 + X_1 (1 + R_2)$$

$$X_1 = \frac{b^2 C}{(L_t^m)^2} + \frac{b^2 - c^2}{c} N_m \sigma_{cm} E$$

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{b^2}{b^2 - c^2} \ln \frac{b}{c} + \frac{1}{4} \frac{c^2}{b^2} - \frac{3}{4} \right)$$

E est une fonction tabulée de c/λ_t (8)

$$R_1 = \frac{N_m \sigma_{cm}}{N_u \sigma_{cu}} \cdot \frac{b^2 - c^2}{a^2} \left[G + a N_u \sigma_{cu} \mathcal{N} \right]$$

G est un fonction tabulé d a et σ_{cu} (8) $N = 1 - \frac{a}{c}$

$$R_2 = \frac{N g \sigma_{og}}{N_u \sigma_{cu}} \cdot \frac{2e}{a} \left[G + \frac{a}{2} N_u \sigma_{cu} N \right]$$

4 - AIRES DE DIFFUSION ET DE RALENTISSEMENT

a) MODERATEUR (percé de canaux).

$$(L_i^+)^2 = (L_i^m)^2 d_i^+$$

$$(L_i^{''})^2 = (L_i^m)^2 d_i^{''}$$

Rappelons que i représente l'indice du groupe de neutrons $i = t$ ou r
Pour le groupe thermique, L_t^m , longueur de diffusion du graphite est normalisée à la valeur de GI donnée au § A.

Pour 1 groupe en ralentissement, on adopte pour l'âge $(L_r^m)^2$ la valeur de 376 cm² avec $\rho = 1,60$ g/cm³.

B) MILIEU MULTIPLICATEUR

$$(L_t^0)^2 = (L_t^m)^2 \frac{b^2}{b^2 - c^2} f \left[R_1 + X_1 (1 + R_2) \right]$$

$$(L_r^0)^2 = (L_r^m)^2 \frac{b^2}{b^2 - c^2} \quad (L_r^m)^2 = 376 - 90 \rho$$

puis on applique :

$$(L_i^+)^2 = (L_i^0)^2 d_i^+$$

$$(L_i^{''})^2 = (L_i^0)^2 d_i^{''}$$

$$\bar{L}_i^2 = \frac{1}{3} \left[2(L_i^+)^2 + (L_i^{''})^2 \right]$$

5 - LAPLACIEN .

Le laplacien matière du réseau ainsi défini est égal à la valeur absolu B_{in}^2 d la racine négative de l'équation :

$$k_\infty = (1 + \alpha \bar{L}_t^2) (1 + \alpha \bar{L}_r^2)$$

En considérant l'anisotropie, les contributions radiales et axiales du laplacien $\left(\alpha^2 = \frac{j^2}{R^2} \right)$ et $\beta^2 = \frac{\kappa^2}{H^2}$ sont solutions de l'équation :

$$k_\infty = \left[1 + \alpha^2 (L_t^+)^2 + \beta^2 (L_i^{''})^2 \right] \left[1 + \alpha^2 (L_r^+)^2 + \beta^2 (L_i^{''})^2 \right]$$

6 - DETERMINATION DES DIMENSIONS GEOMETRIQUES CRITIQUES

Cette détermination peut être faite en écrivant les relations de conservation des flux et des courants aux solutions de continuité des différents milieux multiplicateurs et réflecteurs. En théorie à deux groupes, les flux rapides et thermiques sont donnés par la résolution du système :

$$\left[D_{r}'' \frac{\partial^2}{\partial z^2} + D_{r}^{\perp} \Delta(r) \right] \phi_r - \sum_1 \phi_r + \frac{k_{\infty}}{\tau} \sum_2 \phi_t = 0$$

$$\left[D_t'' \frac{\partial^2}{\partial z^2} + D_t^{\perp} \Delta(z) \right] \phi_t - \sum_2 \phi_t + \tau \sum_1 \phi_r = 0$$

Avec les nouvelles définitions suivantes :

$$\Sigma_2 = \frac{D_t''}{(L_t'')^2} = \frac{D_t^{\perp}}{(L_t^{\perp})^2} \quad = \text{Section efficace thermique}$$

$$\Sigma_1 = \frac{D_r''}{(L_r'')^2} = \frac{D_r^{\perp}}{(L_r^{\perp})^2} \quad = \text{Section efficace de ralentissement.}$$

Les D représentent les coefficients de diffusion pour chaque groupe et chaque direction. Ces équations sont valables quelque soit k_{∞} . En écrivant les conditions aux limites et suivant les exigences géométriques que l'on s'impose (taille critique minimum, hauteur critique ou hauteur extrapolée donnée etc...), on obtient aisément par l'utilisation d'une machine IBM 650, les dimensions critiques et les flux (9). Pour illustrer ceci, nous donnons ci-dessous les résultats de calculs effectués pour GI, à l'aide de cette méthode, en comparaison avec les résultats expérimentaux.

- Unités le cm. -

	Expérimental	Calculé	Expérimental	Calculé
Rayon extrapolé	313,8 ± 2,6	-	265,8 ± 2,2	-
Rayon critique	254,4 ± 0,1	252,2	204,8 ± 0,1	205,9
Economie de réflecteur	59,4 ± 2,5	58,6	61,0 ± 2,1	59,9

Valeurs calculées des constantes neutroniques du réseau G I .

$$\begin{aligned} \epsilon &= 1,02878 \\ \rho &= 0,912071 \\ f &= 0,89466 \\ k_{\infty} &= 1,08427 \\ L_t^2 &= 352,26 \quad \text{cm}^2 \\ L_r^2 &= 441,87 \quad - \\ B_m^2 &= 1,04 \quad \text{m}^{-2} \\ \Sigma_1 &= 0,2965 \quad 10^{-2} \quad \text{cm}^{-1} \\ \Sigma_2 &= 0,278 \quad 10^{-2} \quad \text{cm}^{-1} \\ \lambda_c &= 2,524 \quad \text{cm} \\ \lambda_r &= 2,78 \quad \text{cm} \\ d_t^+ &= 1,1344 \\ d_t'' &= 1,1952 \\ d_r^+ &= 1,1288 \\ d_r'' &= 1,1840 \end{aligned}$$

- BIBLIOGRAPHIE -

- (1) - Communication au journal Européen, en cours de publication
 - (2) - Conférence Genève 1955, P/360, V. RALEVSKI et J. HOROWITZ
 - (3) - Conférence Genève 1955, P/661, Antonov et al -
K H BECKURTS, Zs Naturf, 1956, 11 a, 880
 - (4) - D.J. BEHRENS, Proc. Phys. Soc. 1949, 62, 358 A, 607
 - (5) - C. BESSET et C.P. ZALESKI, non publié
 - (6) - Réacteur GI - Rapport CEA 670 - D
 - (7) - Réacteur GI - Rapport CEA 670 - E 1957
 - (8) - A. AMOYAL et P. BENOIST - Rapport CEA n° 571, 1956
 - (9) - BACHER - PARKER et LAGO-MERCIER, non publié.
 - (10) - Réacteur GI - Rapport C.E.A. 670 - I et J.
-

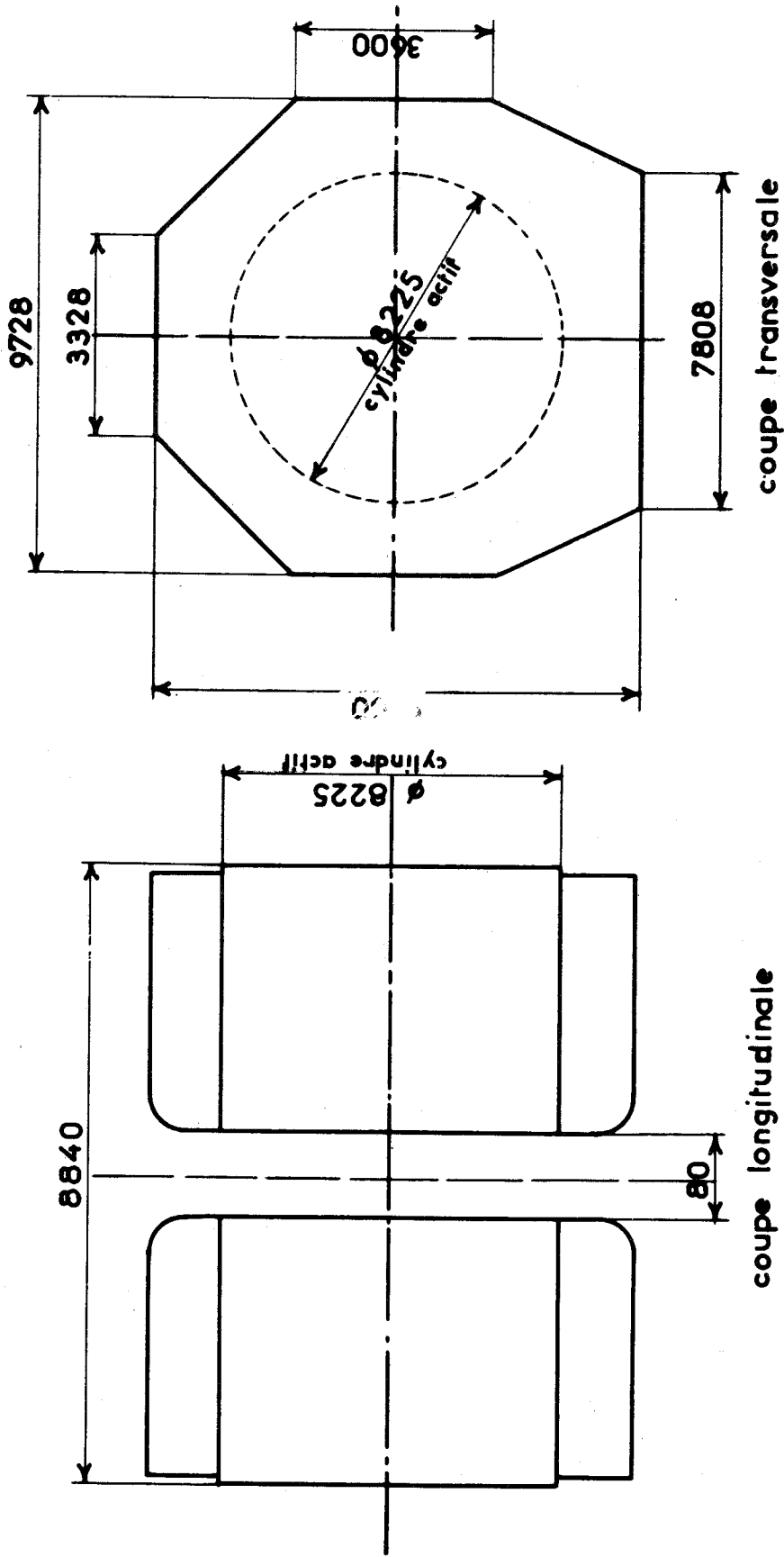
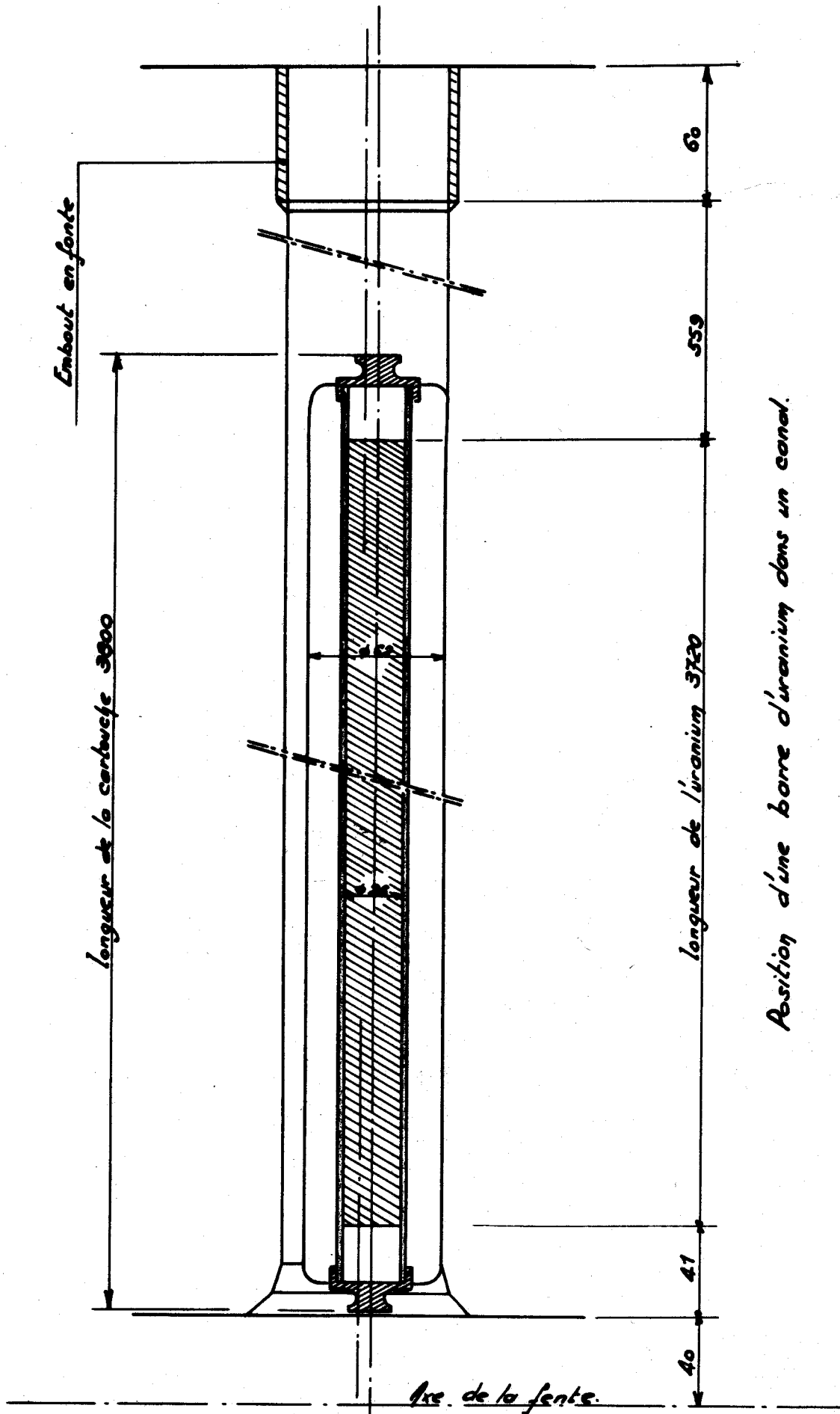


Fig:1

(tous cotes sont en mm.)

- Schéma de l'empilement -

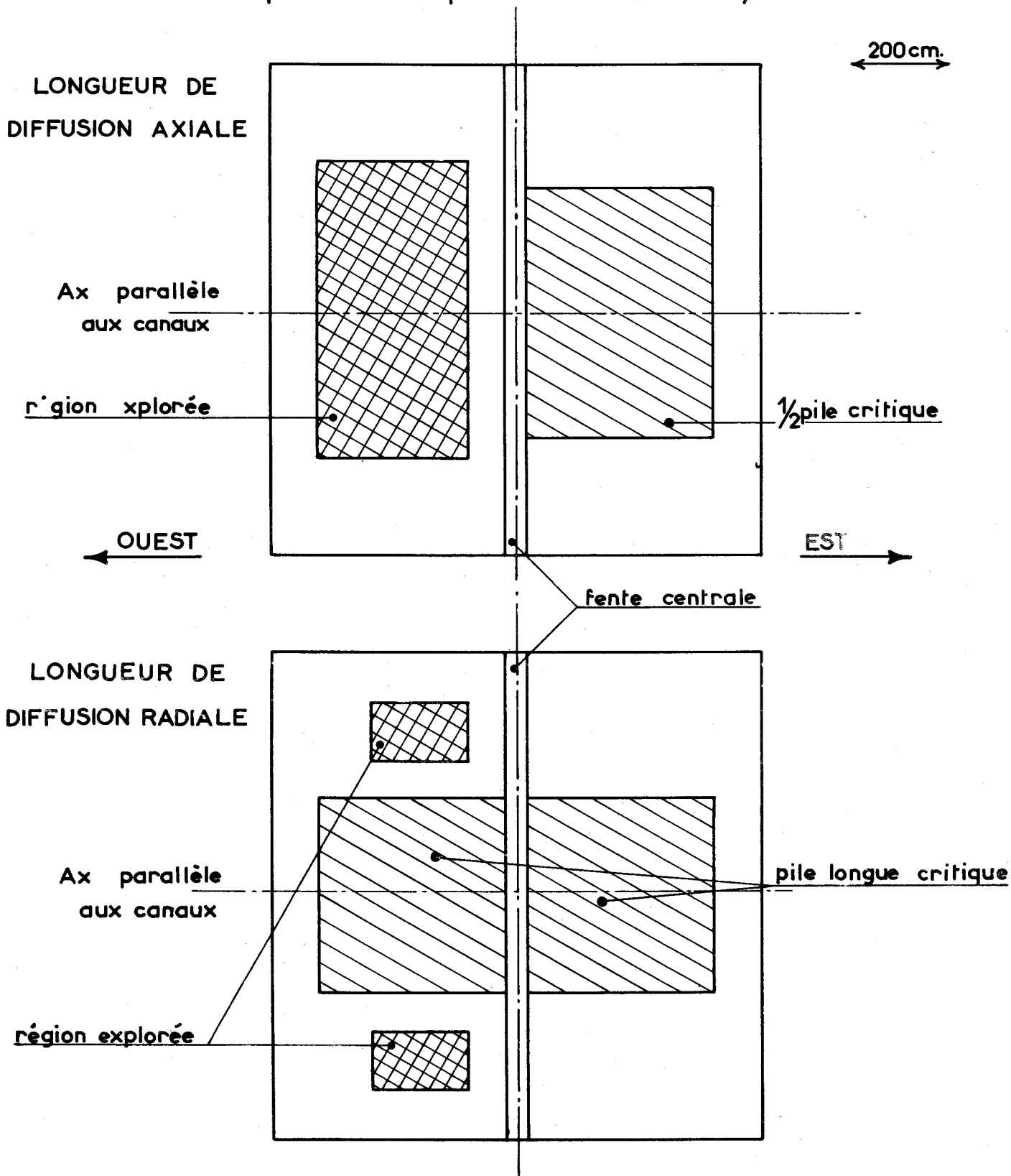


R'act ur G1

Fig.2

FIG: 3 Longueur de diffusion du graphite de G.1

Coupes verticales parallèles à l'axe du cylindre



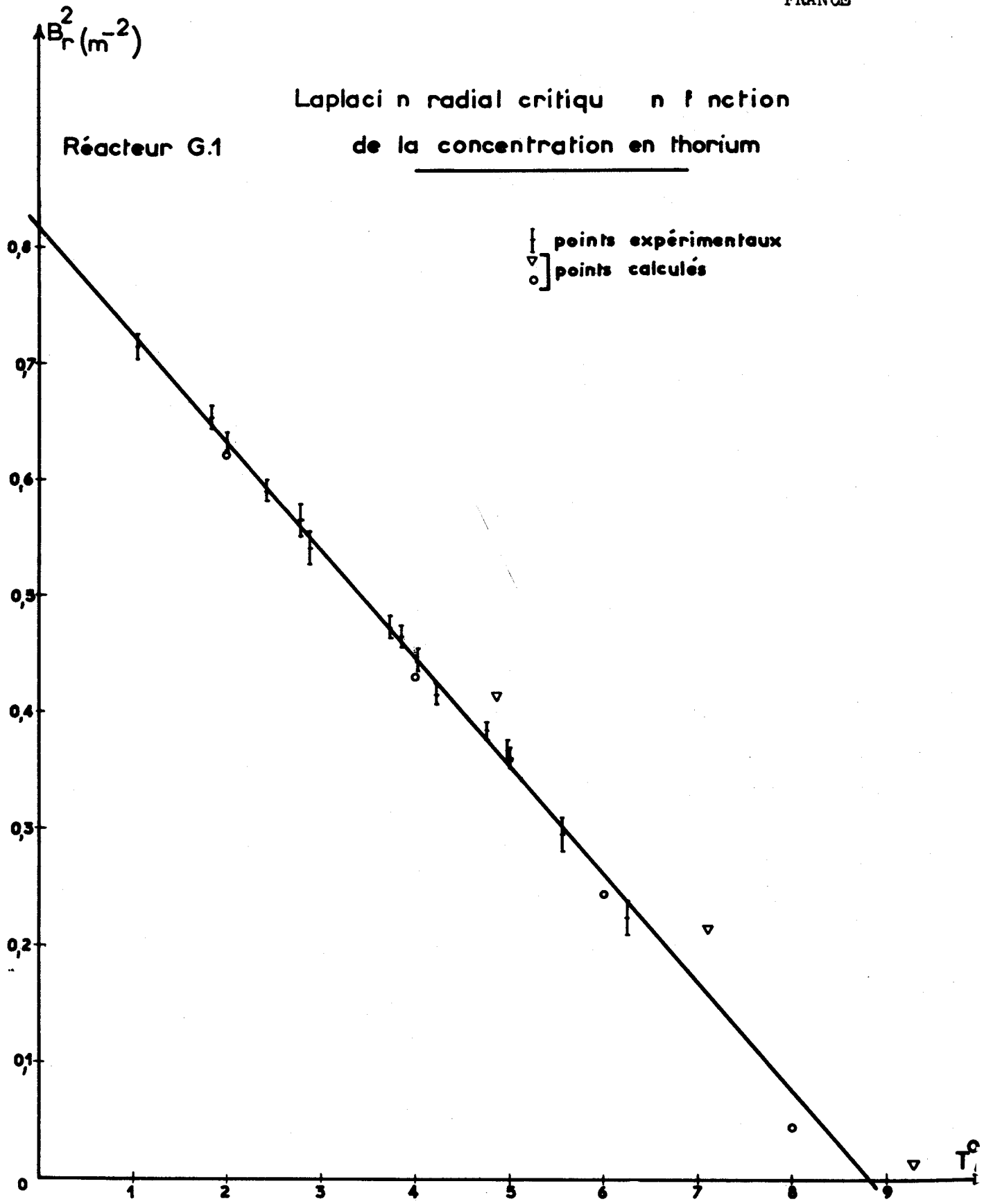


Fig.4

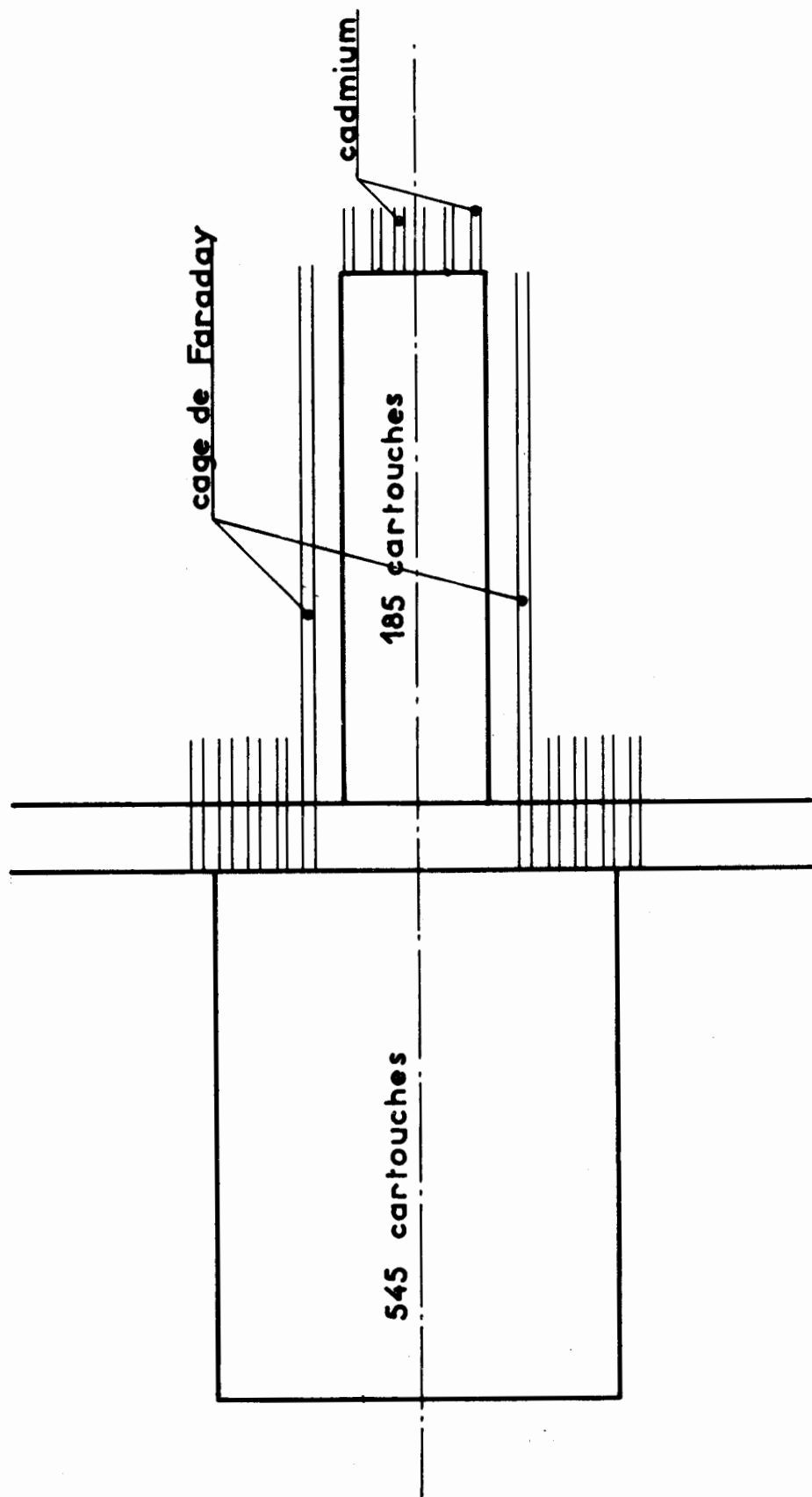


Fig.5 - Schéma d la pil bout ill

Réacteur G.1
Fig.6

