

PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

**ETUDE D'UN REACTEUR A COMBUSTIBLE
LEGEREMENT ENRICHIS (RUBEOLE)
A L'AIDE DE SOURCES PULSEES DE NEUTRONS**

par

M. SAGOT et H. TELLIER

Rapport CEA n° 2201

CENTRE D'ETUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY

1962

Service des Expériences Critiques

ETUDE D'UN REACTEUR A COMBUSTIBLE LEGEREMENT ENRICHI (RUBEOLE)
A L'AIDE DE SOURCES PULSEES DE NEUTRONS

par

M. SAGOT et H. TELLIER

La programmation des divers calculs a été effectuée par
M. F. MORIER

Rapport S.E.C. n° 110, avril 1962

ETUDE D'UN REACTEUR A COMBUSTIBLE LEGEREMENT ENRICHI
(RUBEOLE)

A L'AIDE DE SOURCES PULSEES DE NEUTRONS

De nombreuses expériences ont déjà été effectuées, en alimentant un réacteur par des neutrons issus d'une source pulsée, qui permettent de mesurer le temps de vie des neutrons prompts ou la valeur de barres de sécurité dans ce réacteur dont nous ne citons qu'une faible partie en références (1), (2), (3) et (4). Toutes ces expériences portent sur des réacteurs à combustible très enrichi.

Nous avons appliqué cette méthode à un réacteur utilisant de l'oxyde d'uranium légèrement enrichi, modéré à l'oxyde de béryllium et, après avoir mesuré le temps de vie des neutrons dans deux coeurs différents non réfléchis, nous avons porté notre effort sur la mesure de réactivités négatives importantes introduites dans le réacteur sous différentes formes :

- diminution du volume du coeur non réfléchi,
- introduction de barres absorbantes en cadmium,
- enlèvement de combustible à la périphérie du coeur critique, tout en conservant une hauteur constante,
- substitution d'éléments de combustible par des éléments

.../...

moins réactifs.

Dans tous les cas, les résultats sont comparés aux valeurs obtenues par un autre type d'expérience ou par le calcul.

.../...

1 - RAPPEL DE LA METHODE

De brèves bouffées de neutrons sont envoyées à intervalles réguliers dans un milieu multiplicateur dont on étudie la réponse impulsionnelle. La théorie peut être développée à partir des équations de la diffusion à deux groupes d'énergie en tenant compte d'un groupe de neutrons retardés ; au bout d'un temps suffisamment long pour que les neutrons émis par la source soient ralentis, l'expression du flux de neutrons dans le milieu est la suivante :

$$\varphi = \sum_{l,m,n} B_{l,m,n} \left[e^{-\alpha_{l,m,n} t} + C_{l,m,n} e^{-\alpha'_{l,m,n} t} \right] \quad \begin{array}{l} l,m \geq 1 \\ n \geq 0 \end{array}$$

où $B_{l,m,n}$ est indépendant du temps

$$B_{l,m,n} = A_{l,m,n} \cos \left(l \frac{\pi z}{H} \right) J_n \left(\lambda_{m,n} r \right) \cos n \theta$$

et
$$\alpha_{l,m,n} = \frac{\gamma \beta}{\tau_{l,m,n}} \left[1 - \frac{\Delta k_{l,m,n} (1 - \gamma \beta)}{\gamma \beta} \right] - \lambda$$

$$\alpha'_{l,m,n} = \frac{\lambda \Delta k_{l,m,n}}{\gamma \beta - \Delta k_{l,m,n}}$$

$$C_{l,m,n} = \frac{\lambda}{\gamma \beta / \tau_{l,m,n}} \left(\frac{\gamma \beta}{\gamma \beta - \Delta k_{l,m,n}} \right)^2$$

Dans ces expressions, $\tau_{1,m,n}$ est le temps de vie des neutrons de l'harmonique considéré :

$$\tau_{1,m,n} = \frac{\tau_2}{1 + L^2 B_{1,m,n}^2} + \tau_1 e^{-B_{1,m,n}^2 L^2}$$

τ_2 et τ_1 sont respectivement le temps de vie à l'état thermique et le temps de ralentissement en milieu infini. $\gamma\beta$ est la fraction effective des neutrons retardés, $\frac{1}{\lambda}$ est le temps de vie moyen des neutrons retardés, et

$$\Delta k_{1,m,n} = (k_{eff})_{1,m,n} - 1$$

Le second terme de l'expression du flux correspond aux neutrons retardés et décroît très lentement lorsque Δk est faible : il peut être considéré comme constant pendant la décroissance du premier terme. L'accumulation du flux résiduel correspondant à ce second terme crée donc une composante continue qui vient s'ajouter à celle due à la source constante de fissions spontanées existant dans le milieu. Ces deux composantes continues sont très faibles lorsque le facteur de multiplication k_{eff} est très inférieur à l'unité mais elles deviennent importantes et gênantes lorsque k_{eff} est très voisin de l'unité : la première est alors atténuée en espaçant les bouffées de neutrons. Les harmoniques d'ordre supérieur à 1,1,0 sont beaucoup plus éloignés de la criticalité que le terme fondamental et les fonctions exponentielles d'arguments $\alpha_{1,m,n}$ décroissent donc très rapidement, ce qui permet de simplifier l'expression du flux, au bout d'un temps très court après l'envoi de la bouffée de neutrons :

$$\varphi = B e^{-\alpha t} + F$$

avec
$$\alpha = \frac{\gamma\beta}{\tau} \left[1 - \frac{\Delta k(1-\gamma\beta)}{\gamma\beta} \right] - \lambda$$

.../...

Nous ne faisons pas ici l'approximation habituelle qui consiste à négliger le terme λ car il apporte une correction de l'ordre de un pour cent à la valeur de α lorsque $\Delta k = 0$. Ce terme est cependant négligeable dès que l'on s'éloigne de la criticalité. La mesure de α permet donc de déterminer l'un des deux paramètres $\frac{v_0}{T}$ ou Δk lorsque l'autre est connu.

2 - DESCRIPTION DU REACTEUR RUBEOLF

RUBEOLF est une expérience critique modérée à l'oxyde de béryllium : l'empilement, cylindrique, est traversé par 202 canaux verticaux, disposés suivant un réseau à pas carré de 11,18 cm, qui reçoivent les éléments de combustible ; ces canaux ont une section carrée de 5 x 5 cm. Le diamètre géométrique équivalent de l'empilement est 179,30 cm. Le milieu reproducteur n'est entouré d'aucun réflecteur radial, et la protection biologique qui l'entoure, blindée intérieurement par du cadmium, n'entraîne pas de réflexion parasite décelable (des expériences de référence ont été effectuées avant et après l'édification de cette protection qui est située à 200 cm du bord de l'empilement). Un réflecteur radial peut être ménagé à volonté en sortant le combustible des canaux périphériques. L'empilement d'oxyde de béryllium repose sur un socle en graphite et est surmonté par une semelle en graphite. Le socle inférieur est empoisonné par des manchons de cadmium fixés sur les éléments de combustible ; de même, chaque élément de combustible est entouré à sa partie supérieure par un manchon de cadmium qui, celui-là, est mobile : l'ensemble des 202 manchons de cadmium mobiles, dont les extrémités inférieures sont toutes dans un même plan horizontal, est solidaire d'une plateforme qui peut être lentement manoeuvrée verticalement depuis la salle de contrôle et dont la position est connue à 3/100 mm près (fig. n° 1). Le milieu multiplicateur est ainsi limité en haut et en bas par deux réflecteurs empoisonnés dont les économies sont faibles (de l'ordre de 8 cm dans chacun d'eux) et qui renvoient vers le coeur un flux dont le spectre est à peu près identique à celui régnant dans le coeur : les perturbations spectrales sont évitées par

l'absorption dans le cadmium de l'excédent de neutrons thermiques formés par le ralentissement des neutrons venant du coeur. La hauteur du coeur est donc variable dans notre expérience ce qui permet d'étudier d'une manière très propre des combustibles très différents et, pour un combustible donné, de faire varier le laplacien géométrique de quantités connues.

Les deux types de combustible utilisés dans les expériences décrites ici sont des grappes d'oxyde d'uranium fritté ; les pastilles ont un diamètre de 7 mm et sont contenues dans des tubes en aluminium de diamètre 7,5 x 9 mm ; les grappes sont positionnées dans des tubes d'aluminium de diamètre 37,5 x 39 mm introduits dans les canaux de RUBEOLE ; ce sont ces tubes qui portent les manchons de cadmium inférieurs et le long desquels coulissent les manchons supérieurs. Le combustible appelé dans ce rapport 12 A est constitué par une grappe de 12 barres d'oxyde enrichi à 1,51 % jcintives (écartement entre axes des barres 9 mm).

Le combustible 4B1 est constitué par une grappe de 4 barres d'oxyde enrichi à 3,49 % dont l'écartement entre axes est de 18 mm. Les laplaciens des coeurs radialement non réfléchis constitués avec ces combustibles ont été mesurés par carte de flux et sont respectivement égaux à $12,30 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ et $15,55 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$.

3. APPAREILLAGE EXPERIMENTAL

Les bouffées de neutrons sont émises par des sources de faible volume dont le nombre est variable entre 1 et 4 qui sont réparties autour de l'empilement, dans le plan médian du coeur.

Des impulsions de 3 KV sont transformées en impulsions de 150 KV qui permettent l'émission de neutrons de 14 MeV par la réaction (D, T). Chaque source délivre environ $3 \cdot 10^6$ neutrons par bouffée dont la durée est de 3 à 4 μ s. Les sources sont synchronisées et déclenchées par un dispositif commun. Les fréquences de répétitions utilisées vont de 2,5 (réacteur très sous-critique) à 0,1 (réacteur très proche de la criticité) impulsions par seconde.

Le détecteur de neutrons est un compteur BF3 placé dans le même plan que les sources à l'extérieur de l'empilement. L'analyseur en temps utilisé au cours des premières expériences sur le réseau 4B1 est un analyseur ELA à 100 canaux ; les pertes de comptage excessives dues aux dékatrons des voies de comptage nous ont amenés à le remplacer ensuite par un analyseur TMC à 256 canaux ; des mesures de recouplement permettent d'affirmer l'identité des résultats obtenus avec l'un ou l'autre de ces analyseurs.

Les pertes de comptage de l'ensemble BF3-TMC sont dues uniquement au BF3 dont le temps mort a été mesuré par la méthode des sources additionnelles à l'aide de 4 sources

.../...

de Ra-Be et d'un jeu de chemises absorbantes entourant le compteur ; la valeur trouvée, constante avec le taux de comptage, est 4 μ s.

Les pertes de comptages du sélecteur ELA ont été déterminées de la même manière : elles varient avec le taux de comptage et les mesures effectuées avec ce sélecteur ont toujours été corrigées en utilisant la courbe expérimentale des pertes.

Le diagramme de la Figure n° 2 schématise le montage électronique.

Les largeurs de canaux utilisées sont indiquées dans les tableaux des résultats expérimentaux. Le grand nombre de canaux de nos sélecteurs a été mis à profit pour déterminer avec précision la somme des deux composantes continues. En règle générale, 2 à $3 \cdot 10^5$ coups sont comptés dans l'ensemble des canaux ce qui correspond à un nombre de bouffées de neutrons compris entre 1 000 et 10 000 par mesure de α .

.../...

4. MESURE DU TEMPS DE VIE SUR PILE NON REFLECHIE

Rappelons l'expression de α , argument de la fonction exponentielle qui exprime la décroissance du flux après l'envoi d'une bouffée de neutrons :

$$\alpha = \frac{\gamma_B}{\tau} \left[1 - \frac{\Delta k (1 - \gamma_B)}{\gamma_B} \right] - \lambda$$

α peut également s'écrire en fonction de la variation du laplacien géométrique, lorsque la variation de réactivité du coeur est obtenue par changement de la hauteur, c'est-à-dire du volume, du coeur :

$$\alpha = \frac{\gamma_B}{\tau} + \frac{1}{\tau} \frac{M^2}{k_\infty} \Delta B^2 - \lambda$$

α est donc une fonction linéaire de ΔB^2 ou de Δk qu'il suffit d'extrapoler à $\Delta B^2 = \Delta k = 0$ pour obtenir la valeur α_c qui correspond à l'état critique :

$$\alpha_c = \frac{\gamma_B}{\tau} - \lambda$$

d'où l'on déduit $\frac{\gamma_B}{\tau}$. L'extrapolation $\alpha = 0$ permet d'obtenir la valeur de γ_B , mais avec une précision douteuse.

En fait la variation de α n'est linéaire que dans la mesure où τ et γ_B sont des constantes ; en réalité, le temps de vie est fonction du laplacien géométrique par les termes de fuite qui affectent les temps de ralentissement τ_1 et de absorption τ_2 à l'état thermique en milieu infini. De même le facteur

.../...

d'efficacité des neutrons retardés λ dépend des fuites. L'écart de λ à la fonction linéaire est par conséquent

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta \gamma \beta}{\gamma \beta} - \frac{\Delta \tau}{\tau}$$

avec

$$\frac{\Delta \gamma \beta}{\gamma \beta} = A \frac{L_1^2 \Delta B^2}{1 + A L_1^2 B_c^2}$$

B_c^2 = Laplacien matière

$$A = \frac{L E_p / E_R}{L E_p / E_{th}}$$

E_p = énergie moyenne d'émission des neutrons prompts ($E_p = 1,98$ MeV).

E_R = énergie moyenne d'émission des neutrons retardés ($E_R = 0,45$ MeV).

E_{th} = énergie moyenne des neutrons thermiques.

$$\text{et } \Delta \tau = \frac{\tau_2}{1 + L_2^2 B_c^2} \times \frac{L_2^2 \Delta B^2}{1 + L_2^2 (B_c^2 + \Delta B^2)} + \tau_1 e^{-B^2 L_1^2} \left[1 - e^{-\Delta B^2 L_1^2} \right]$$

On interprète les mesures expérimentales de λ soit en les corrigeant par le calcul tant que les corrections restent faibles, soit directement mais en n'admettant plus leur variation linéaire en fonction de Δk . Cependant l'expérience nous a montré que la variation de λ en fonction de ΔB^2 restait linéaire dans le domaine exploré.

Nous avons effectué deux séries de mesures de λ sur le coeur non réfléchi, chargé d'une part en combustible 4 B, d'autre part en combustible 12 A, dont les résultats sont portés dans les tableaux I et II ci-dessous.

TABLEAU I

RESEAU 202 - 4 B1

$-\Delta k(10^5)$	ΔB^2 m^{-2}	FREQUENCE DE REPETITION Hz	LARGEUR DE CANAL μs	PERIODE DE DECROISSANCE ms	EXPERIMENTAL s^{-1}
46	0,0141	0,100	3 077	81,46	12,27
105	0,0411	0,338	"	78,42	12,75
146	0,0503	"	"	71,47	13,99
201	0,0740	"	"	68,39	14,62
249	0,0865	0,983	"	63,55	15,74
297	0,1032	"	"	62,47	16,01
342	0,1192	"	"	56,52	17,69
526	0,1811	"	"	48,71	20,53
811	0,2801	"	"	38,95	25,67
1 033	0,3581	"	"	33,78	29,60
1 811	0,6320	"	"	23,10	43,29
2 591	0,9114	"	1 538,5	17,32	57,74
3 515	1,2534	"	"	13,68	73,10
5 697	2,0749	"	769,25	8,77	114,0
7 492	2,7753	"	"	6,68	149,7
9 935	3,7798	"	384,6	5,14	194,5
13 976	5,5673	"	192,3	3,45	289,9

TABLEAU II

RESEAU 202 - 12 A

$-\Delta k(10^5)$	ΔB^2 m^{-2}	FREQUENCE DE REPETITION Hz	LARGEUR DE CANAL μs	PERIODE DE DECROISSANCE ms	α EXPERIMENTAL s^{-1}
92	0,0391	0,33	1 280	57,068	17,52
124	0,0530	"	"	53,508	18,69
189	0,0773	"	"	51,382	19,46
236	0,1013	"	"	47,562	21,02
320	0,1357	"	"	43,794	22,83
599	0,2578	1,0	640	34,253	29,19
805	0,3426	"	"	29,800	33,56
1 212	0,5183	"	320	22,877	43,71
1 856	0,7982	1,66	"	16,990	58,86
2 533	1,0975	"	"	13,370	74,79
4 018	1,7669	2,5	160	8,702	114,9
4 827	2,1415	"	"	7,422	134,7
5 691	2,5480	"	"	6,378	156,8
6 607	2,9870	"	"	5,417	184,6
7 525	3,4362	"	"	4,883	204,8
8 621	3,9834	"	"	4,247	235,5
10 506	4,9573	"	"	3,591	278,5
12 168	5,8501	"	80	2,923	342,1
13, 736	6,7232	"	40	2,607	383,6
15,700	7,8634	"	"	2,223	449,8
17 507	8,9993	"	"	2,036	491,1

Les changements de réactivité sont obtenus par variation de volume en diminuant la hauteur du coeur ; les économies des réflecteurs axiaux empoisonnés sont mesurées par relevé de flux en coeur critique. Le facteur de multiplication des coeurs sous-critiques est calculé à partir de l'écart de leur hauteur à la hauteur critique et de la valeur de la réactivité différentielle mesurée par plusieurs approches sur-critiques : on effectue pour cela plusieurs divergences à des hauteurs légèrement sur-critiques et la réactivité est chaque fois déduite du temps de doublement par l'intermédiaire de la formule de Nordheim :

réactivité différentielle mesurée :
$$\left(\frac{d\rho}{dH}\right)_c = \frac{C}{H_c^3}$$

réactivité d'un coeur de hauteur H :

$$\Delta\rho = C \int_{H_c}^H \frac{dH}{H^3} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\rho}{dH}\right)_c H_c^3 \left[\frac{1}{H_c^2} - \frac{1}{H^2} \right]$$

H_c est la hauteur critique à la température de l'expérience.

$$\Delta k = \frac{\rho}{1 - \rho}$$

Les réactivités différentielles à la criticalité des deux coeurs étudiés sont :

$$\left(\frac{d\rho}{dH}\right)_{4B4} = 48,0 \pm 1,0 \cdot 10^{-5}/\text{mm}$$

$$\left(\frac{d\rho}{dH}\right)_{12A} = 18,5 \pm 0,2 \cdot 10^{-5}/\text{mm}$$

.../...

Les expériences ont porté sur des coeurs sous-critiques de $- 46 \cdot 10^{-5}$ à $- 0,17 \cdot 500$. Les mesures très sous-critiques ne sont pas nécessaires à la détermination du temps de vie, mais seront utilisées ultérieurement pour le calibrage de barres de sécurités. Les figures 3 et 4 donnent deux exemples de décroissance du flux dans les conditions les plus défavorables : le premier correspond à $\Delta k = - 92 \cdot 10^{-5}$; la correction de composante continue est très importante. Le second correspond à $\Delta k = - 0,13 \cdot 976$; on voit apparaître en début de décroissance les harmoniques supérieurs. Ce sont des cas extrêmes et la précision des mesures est évidemment meilleure pour les cas intermédiaires où la composante continue est négligeable et les harmoniques inexistantes. Dans tous les cas, la détermination de α est effectuée par méthode des moindres carrés en affectant chaque point d'un coefficient de pondération qui tient compte de son imprécision statistique liée au nombre de coups comptés et à la correction de composante continue.

La figure 5 présente les résultats obtenus jusqu'à $\Delta k = - 1 \cdot 000 \cdot 10^{-5}$, corrigés des variations de τ et $\sqrt{\beta}$; la figure 6 indique l'ensemble des résultats bruts. Les courbes tracées en traits espacés sont calculées à partir de l'exploitation des mesures entre $\Delta k = 0$ et $\Delta k = 2 \cdot 000 \cdot 10^{-5}$; les courbes en trait plein correspondent aux dépouillements effectués en utilisant tous les résultats et en supposant une variation parabolique de α en fonction de Δk . L'écart entre les deux séries de courbes est significatif et doit être imputé au calcul qui n'est sans doute pas assez élaboré.

Quatre exploitations des résultats sont systématiquement effectuées en machine IBM 7090 par la méthode des moindres carrés :

- variation linéaire de α corrigé en fonction de Δk et de ΔB^2

.../...

pour $|\Delta k| < 2\ 000\ 10^{-5}$

- variation parabolique de α expérimental en fonction de Δk
et de ΔB^2 en utilisant l'ensemble des résultats.

- TABLEAU III -

(voir page 17)

TABLEAU III

RESULTATS EXPERIMENTAUX

PILE 4 B1 SANS REFLECTEUR					PILE 4 B1 REFLECHIE (60 CANAUX)				
	$\delta\beta/\tau$	$\delta\beta$	τ	ΔB_P^2		$\delta\beta/\tau(s^{-1})$	$\delta\beta_{10^{-5}}$	$\tau(\mu s)$	$\Delta B_P^2(m^{-2})$
$\alpha_{cor} = f(\Delta k)$	11,322	641,4	566,5	-	$\alpha_{cor} = f(\Delta k)$	9,825	698,9	711,3	-
$\alpha_{exp} = f(\Delta k)$	11,526	676,2	586,7	-	$\alpha_{exp} = f(\Delta k)$	9,711	678,2	698,3	-
$\alpha_{cor} = f(\Delta B^2)$	11,287	652,1	577,7	0,2234	$\alpha_{cor} = f(\Delta B^2)$	9,835	714,1	725,8	0,2223
$\alpha_{exp} = f(\Delta B^2)$	11,447	673,7	588,5	0,2308	$\alpha_{exp} = f(\Delta B^2)$	9,810	701,6	715,2	0,2183
moyenne	11,3955	660,8	579,85	0,2271	moyenne	9,796	698,2	712,6	0,2203
	$\pm 0,12$	± 20	± 18			$\pm 0,11$	± 35	± 36	

PILE MIXTE (44 CANAUX 12 A)					PILE 12 A SANS REFLECTEUR				
	$\delta\beta/\tau$	$\delta\beta$	τ	ΔB_P^2		$\delta\beta/\tau$	$\delta\beta$	τ	ΔB_P^2
$\alpha_{exp} = f(\Delta k)$	13,351	649,3	486,3	-	$\alpha_{cor} = f(\Delta k)$	15,519	671,1	452,4	-
$\alpha_{exp} = f(\Delta B^2)$	13,394	662,3	494,5	0,2529	$\alpha_{exp} = f(\Delta B^2)$	15,347	652,7	425,2	-
moyenne	13,372	655,8	490,4	0,2529	$\alpha_{cor} = f(\Delta B^2)$	15,588	690,6	443,0	0,2916
	$\pm 0,15$	± 33	± 25		$\alpha_{exp} = f(\Delta B^2)$	15,217	643,7	423,0	0,2718
					moyenne	15,418	664,5	430,9	0,2817
						$\pm 0,17$	± 15	± 10	

$\alpha_{cor} = f(\Delta k)$
 $\alpha_{cor} = f(\Delta B^2)$

exploitation suivant une fonction
 linéaire des résultats corrigés
 pour $|\Delta k| < 2.000 \cdot 10^{-5}$

$\alpha_{exp} = f(\Delta k)$
 $\alpha_{exp} = f(\Delta B^2)$

exploitation suivant une fonction
 parabolique de l'ensemble des ré-
 sultats bruts

Le tableau III résume l'ensemble des valeurs de γ_B/τ , γ_B , τ et la diminution du laplacien ΔB_p^2 qui correspond à l'état promo'-critique.

Les valeurs adoptées sont comparées ici avec les valeurs calculées :

	RESEAU 4 B 1		RESEAU 12 A	
	Expérience	Calcul	Expérience	Calcul
$\frac{\gamma_B}{\tau} (s^{-1})$	$11,39 \pm 0,12$	11,624	$15,42 \pm 0,17$	15,262
$\gamma_B (10^{-5})$	661 ± 20	677,2	$664,5 \pm 15$	682,5
$\tau (\mu s)$	580 ± 18	582,6	431 ± 10	447,2
$\Delta B_p^2 (m^{-2})$	0,227		0,282	

Les valeurs de γ_B calculées sont obtenues à partir des valeurs publiées par KEEPIN et al (5) pour les neutrons retardés et par KRASIN et al (6) pour les photoneutrons retardés du béryllium.

L'erreur sur les valeurs de γ_B résulte d'une part de l'erreur sur γ_B/τ , d'autre part de l'erreur effectuée soit sur l'étalonnage des Δk , soit sur la conversion de ΔB^2 en Δk ; cette dernière est prépondérante et entraîne une incertitude relativement plus importante sur γ_B , et par conséquent sur le temps de vie τ , que sur γ_B/τ .

5 - ETALONNAGE DE BARRES DE SECURITE

Faisant suite aux expériences précédentes sur le réseau 4 B1 nous avons étudié l'étalonnage d'absorbants placés dans ce réseau. Pour toutes ces mesures, la hauteur du coeur reste inchangée, c'est la hauteur critique H_c du milieu pur. La réactivité négative étant introduite dans ce milieu sous forme de divers absorbants, on étudie la décroissance du flux après l'envoi des bouffées de neutrons ; la comparaison directe de α avec la courbe du réseau 4 B1 de la figure 6 nous donne Δk correspondant, dont la valeur de la réactivité ρ est déduite.

Dans chaque cas, cette réactivité est mesurée par une autre méthode : le milieu qui contient l'absorbant à étalonner est amené à la criticalité par augmentation de sa hauteur : on mesure ainsi la variation du laplacien critique imposée par cet absorbant, c'est-à-dire la réactivité négative de celui-ci si l'on connaît la réactivité différentielle $\frac{\partial \rho}{\partial H}$. Nous avons là une comparaison directe avec la méthode de la source pulsée.

Le tableau IV indique les résultats de ces deux ensembles de mesures ; la position des barres de sécurité et des canaux vidés de combustibles peut être trouvée sur les figures 1 (Mesure n° 1) et 7.

Les barres de sécurité sont des tubes de cadmium d'épaisseur 0,4 mm et de diamètre 39 mm ; elles traversent complètement le coeur.

.../...

La plaque de cadmium de dimensions 310 x 30 x 0,4 mm est placée horizontalement dans le coeur ; une correction est apportée à son étalonnage par la méthode de variation du laplacien critique qui tient compte de la variation de sa position relative par rapport au maximum du flux axial en pile sous-critique pulsée et en pile critique avec la plaque dans le coeur.

La réactivité introduite par l'absence de combustible dans un canal est déterminée par la mesure du temps de doublement du réacteur avec et sans l'élément combustible.

Les canaux vidés de combustible, lorsque deux barres de sécurité sont au centre du réacteur, sont destinés à la mise en évidence d'harmoniques d'ordre supérieur ; un compteur BF 3 est placé successivement dans chacun de ces canaux, juste au-dessus du coeur. Nous avons ainsi deux positions qui correspondent à peu près au maximum et au minimum de l'harmonique $J_0(\lambda_2 r)$ engendré par les deux barres de sécurité voisines de l'axe du réacteur.

La figure 8 montre les courbes de décroissance obtenues dans cette configuration avec le compteur placé en ces deux positions. On peut constater que les harmoniques sont visibles dans les deux cas mais ne gênent aucunement les mesures si l'on adopte un retard à l'analyse convenable. La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes portés dans le tableau IV est très satisfaisante ; les valeurs trouvées pour la réactivité négative d'environ 11 dollars sont particulièrement en bon accord. Par contre, ces résultats seraient entachés d'une erreur systématique pour des réactivités négatives plus importantes si les α mesurés étaient comparés non plus à la courbe purement expérimentale de la figure n° 6 mais à la courbe calculée à partir des résultats expérimentaux obtenus pour $\Delta k \ll 2\ 000\ 10^{-5}$ (valeurs de ρ portées dans la dernière colonne du tableau IV. Notre calcul du temps de vie pour un milieu très sous-critique étant erroné, il devrait alors être repris plus

profondément.

Les marges d'erreur portées dans le tableau IV ne tiennent pas compte de l'erreur systématique possible sur Δk introduite lors de l'étalonnage par l'intermédiaire de la mesure de la réactivité différentielle $d\rho/dH$ à la criticalité : la même erreur systématique entache également les résultats portés dans l'avant dernière colonne du tableau, par conséquent n'intervient pas dans la comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes ; cette erreur supplémentaire sur la valeur absolue des réactivités mesurées serait, dans les deux cas, de l'ordre de $\pm 2\%$.

.../...

TABLEAU IV

MESURES D'ANTIREACTIVITE

N° de mesure	Absorbant	α_{exp} s ⁻¹	$-\Delta k = 1 - K_{eff}$ 10 ⁻⁵	Sources pulsées courbe expériment.	$-P(10)^5$ Variation de B ²	Sources pulsées Courbe calculée
1	Sécurité auxiliaire	24,32	753,5	759 ± 11	771	751
2	1 barre Cadmium et 1 canal vide	40,05	1657	1685 ± 25	1742	1669
3	1 barre de cadmium	70,97	3382	3500 ± 53	3507	3450
4	2 barres cadmium et 3 canaux vides	140,25	7030	7562 ± 113	7644	7614
5	1 élément de combustible	14,69	191,4	191,8 ± 3	190*	193

* mesure effectuée par divergence

6 - MESURES SUR PILE RADIALEMENT REFLECHIE PAR
L'OXYDE DE BERYLLIUM

a) Mesure du temps de vie

Le temps de vie est déterminé par approche sous-critique en expériences pulsées comme pour les piles radialement nues. Il ne reste ici que 60 canaux chargés de combustible 4 B1 au centre du massif d'oxyde de beryllium (figure n° 7) ; le rayon géométrique équivalent du coeur est 48,86 cm et l'épaisseur du réflecteur, à canaux de combustible vides, est 40,79 cm. L'empoisonnement des réflecteurs supérieur et inférieur est maintenu par des manchons de cadmium, aussi bien dans le prolongement du coeur que dans celui du réflecteur radial, ce qui conserve une géométrie aussi propre que possible.

Les résultats des mesures sont portés sur les figures 5 et 6 et le tableau III. L'influence du réflecteur sur le temps de vie est nettement mise en évidence : l'augmentation mesurée du temps de vie due à la présence du réflecteur est de 23 %, en bon accord avec la valeur calculée qui est de 22,5 %.

Le calcul du temps de vie pour les piles à plusieurs milieux est fait à deux groupes (Réf. 7).

$$\tau = \frac{\sum_i \frac{1}{V_1} \int_{\text{milieu } i} \phi_1^* \phi_1 dV + \frac{1}{V_2} \int_{\text{milieu } i} \phi_2^* \phi_2 dV}{\sum_i \int_{\text{coeur } i} (\nu \Sigma_f)_1 \phi_1^* \phi_1 dV + \int_{\text{coeur } i} (\nu \Sigma_f)_2 \phi_1^* \phi_2 dV}$$

Les différentes intégrales sont obtenues à l'aide du code RIFIFI (Ref. 8).

Les erreurs sur τ de la pile réfléchie et de la pile mixte, portées dans le tableau III, sont supérieures en valeur relative aux erreurs qui affectent τ des piles nues par suite de l'imprécision plus grande sur la mesure de la réactivité différentielle critique (nombre de mesures plus faible).

b) Mesure de l'économie d'un réflecteur variable

Nous avons essayé une application originale de la méthode des sources de neutrons pulsées qui consiste à déterminer l'économie de réflecteur d'une pile lorsque l'on change l'épaisseur du réflecteur.

Le réflecteur d'épaisseur variable est obtenu à RUBEOLE par le déchargement du combustible à la périphérie du coeur, les réflecteurs axiaux restant toujours empoisonnés. La hauteur du coeur, et par conséquent du réflecteur axial, est constante pour toutes les expériences : c'est la hauteur critique du coeur totalement chargé en combustible 4 B). Nous mesurons, pour chaque épaisseur de réflecteur, l'argument α_R de la décroissance exponentielle du flux.

$$\alpha_R = \frac{(\gamma\beta)_R}{\tau_R} \left[1 - \frac{\Delta k (1 - (\gamma\beta)_R)}{(\gamma\beta)_R} \right]$$

$(\gamma\beta)_R$ et τ_R sont relatifs à la configuration étudiée. L'écart à l'unité, Δk , du facteur de multiplication est le même que l'on se réfère à la pile critique sans réflecteur (les 202 canaux chargés de combustible) ou à la pile critique avec réflecteur (hauteur critique

plus grande). Par conséquent, à valeur égale de Δk , la valeur de α que l'on mesurerait en pile sans réflecteur serait

$$\alpha_{202} = \frac{\gamma\beta}{\tau} \left[1 - \frac{\Delta k (1 - \gamma\beta)}{\gamma\beta} \right]$$

où $\gamma\beta$ et τ sont relatifs à la pile sans réflecteur.

Comme $\gamma\beta$ et $(\gamma\beta)_R$ sont peu différents [$(\gamma\beta)_R$ est un peu supérieur à $\gamma\beta$ par suite de la naissance de photo-neutrons retardés dans le réflecteur], nous écrivons

$$\alpha_{202} = \alpha_R \frac{\tau_R}{\tau}$$

Le temps de vie τ_R est obtenu par le calcul et les valeurs expérimentales α_R sont corrigées du facteur $\frac{\tau_R}{\tau}$ pour obtenir des valeurs α_{202} qui sont alors exploitées en utilisant la courbe expérimentale

$\alpha_{202} = f(\Delta k)$ de la figure 6 qui correspond au réseau 4 B1 sans réflecteur et dont l'équation est:

$$\alpha_{202} = 11,4496 + 0,01693 \Delta k + 0,1974 \cdot 10^{-6} (\Delta k)^2$$

On détermine ainsi l'écart Δk à l'unité du facteur de multiplication pour chaque épaisseur de réflecteur étudiée. Cet écart correspond à une variation du laplacien géométrique ΔB^2 qui est intégralement imputable au laplacien radial B_{\perp}^2 , puisque dans nos expériences la hauteur du coeur et, par conséquent, le laplacien axial B_{\parallel}^2 , reste inchangée. Le laplacien radial du coeur nu, mesuré par carte de flux, est égal à $7,00 \text{ m}^{-2}$; le laplacien radial des coeurs réfléchis est donc $B_{\perp}^2 = 7,00 + \Delta B^2 = \left(\frac{2,405}{R_{\text{exp}}} \right)^2$

De la connaissance du rayon extrapolé R_{exp} ainsi

.../...

obtenue et du rayon géométrique moyen du coeur, on déduit immédiatement l'économie du réflecteur δR . Les résultats sont présentés dans le tableau V et sur la figure 9 où ils sont comparés avec les valeurs calculées à l'aide du code RIFIFI.

- TABLEAU V -

(voir page 27)

.../...

- TABLEAU V -

ECONOMIE DE REFLECTEUR RADIAL

:	:	:	:	:	:	:	:
: Nombre de canaux du	: 202	: 170	: 132	: 98	: 78	: 60	:
: coeur	:	:	:	:	:	:	:
: Epaisseur du réflecteur	: 0	: 7,41	: 17,18	: 27,21	: 33,94	: 40,79	:
: (cm)	:	:	:	:	:	:	:
: α_R (sec-1)	:	: 15,10	: 32,37	: 76,63	: 115,61	: 170,36	:
: α_{202} (sec-1)	: 11,43	: 15,11	: 33,26	: 82,69	: 131,45	: 208,71	:
: Δk	:	: 0,00203	: 0,01266	: 0,04002	: 0,06586	: 0,10385	:
: ΔB^2 (m ⁻²)	:	: 0,07	: 0,44	: 1,43	: 2,42	: 3,97	:
: R_{exp} (cm)	: 90,90	: 90,44	: 88,16	: 82,82	: 78,35	: 72,61	:
: δr pulsé (cm)	:	: 8,20	: 15,69	: 20,38	: 22,64	: 23,75	:
:	:	: ± 0,02	: ± 0,12	: ± 0,30	: ± 0,40	: ± 0,55	:
: δr_{Rififi} (cm)	:	: 10,10	: 16,39	: 20,52	: 22,32	: 23,70	:
:	:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:	:

On voit que l'accord est excellent pour les fortes épaisseurs de réflecteur, mais qu'il laisse à désirer pour les faibles épaisseurs : les valeurs expérimentales sont certainement les meilleures dans cette zone où la théorie de la diffusion s'accorde mal d'un réflecteur à grandes cavités dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques libres parcours de tr: rt.

On peut aussi comparer l'économie de réflecteur du coeur à 60 canaux de combustible à la valeur déduite d'une mesure absolue du laplacien par carte de flux effectuée sur une pile dont les dimensions neutroniques étaient très voisines : cette pile possédait un réflecteur radial empoisonné au cadmium qui ne perturbait pas le spectre du flux dans le coeur ; sa hauteur critique était très proche de celle de la pile à 60 canaux ce qui nous entraîne à ne faire qu'une faible correction d'anisotropie sur le laplacien matière de cette pile pour obtenir le laplacien de la pile réfléchi.

On trouve ainsi que le laplacien radial de la pile à 60 canaux est $11,04 \text{ m}^{-2}$ et que l'économie de réflecteur est donc $(23,50 \pm 0,30) \text{ cm}$; la valeur trouvée par la source pulsée est $(23,75 \pm 0,55) \text{ cm}$ ce qui est satisfaisant.

7 - EXPERIENCES PULSEES EN PILE MIXTE

Une méthode de mesure du laplacien matière d'un réseau couramment utilisée en France est la méthode dite de substitution (Ref. 9 et 10). Elle consiste à mesurer la variation de réactivité ou de laplacien critique provoquée par la substitution, dans un réseau de référence bien connu, d'éléments de combustible de ce réseau de référence par des éléments de combustible du réseau à étudier. La zone substituée est centrale, et son rayon est progressivement augmenté, normalement jusqu'à environ un tiers du rayon du coeur de référence. On déduit le laplacien matière du réseau étudié de celui du réseau de référence par la théorie des perturbations.

Nous avons pensé que la méthode des sources de neutrons pulsées/pouvait être utile à la mesure des différences de laplacien dans le cas où le réseau étudié est très peu réactif et où les dimensions de l'expérience critique ne sont pas suffisantes pour atteindre la criticalité. Nous avons donc supposé que nous ne pouvions pas augmenter la hauteur du coeur au-delà de celle qui correspond à la criticalité pour le réseau 4 B1 et nous avons substitué successivement dans 2, 8, 16, 26, et 44 canaux le combustible 4B1 par le combustible, moins réactif, 12 A.

Une expérience pulsée est effectuée après chacune de ces substitutions, la hauteur du coeur restant inchangée : le résultat brut est une valeur de α : $\alpha = \alpha_s$.

$$\alpha_s = \left(\frac{\beta}{\tau}\right)_s + \frac{1}{\tau_s} \left(\frac{M^2}{k_{\infty}}\right)_s AB^2$$

Comme au chapitre précédent, ces valeurs α_s sont modifiées pour pouvoir être exploitées à l'aide de la courbe expérimentale obtenue sur le coeur 4 Bipur et non réfléchi.

$$\alpha_{202} = 11,3714 + 49,589 \Delta B^2$$

Deux corrections sont à apporter sur les valeurs α_s . La première porte sur le temps de vie, la seconde sur $\frac{M^2}{K_{\infty}}$

Un calcul est effectué pour chacune des substitutions en supposant que les caractéristiques du réseau 12 A substitué sont approximativement connues. Le temps de vie τ_s et le rapport $\left(\frac{M^2}{k_{\infty}}\right)_s$ sont déterminés à partir des valeurs τ_{4B} , τ_{12A} ,

$\left(\frac{M^2}{k_{\infty}}\right)_{4B}$ et $\left(\frac{M^2}{k_{\infty}}\right)_{12A}$ en les pondérant par les poids statistiques

des deux régions calculées par le code RIFIFI.

Le tableau VI compare les variations de laplacien mesurées par cette méthode d'une part, par détermination de hauteur critique (méthode classique) d'autre part. Ce tableau porte également la mesure en "substitution totale", c'est-à-dire le cas extrême où le coeur est complètement chargé en combustible 12 A : l'ensemble des résultats est parfaitement cohérent.

Le calcul du temps de vie τ_s a été vérifié par la mesure de ce temps de vie par approche sous-critique en source pulsée sur le réseau aux 44 canaux centraux substitués par du combustible 12 A (tableau III). L'accord est bien satisfaisant.

$$\frac{\gamma\beta}{\tau_s} \text{ calculé} = 13,377 \text{ s}^{-1} \quad \left| \quad \tau_s \text{ calculé} = 508,2 \mu\text{s} \right.$$

$$\frac{\gamma\beta}{\tau_s} \text{ mesuré} = 13,37 \pm 0,15 \text{ s}^{-1} \quad \left| \quad \tau_s \text{ mesuré} = 490 \pm 25 \mu\text{s} \right.$$

.../...

TABLEAU VI

VARIATION DU LAPLACIEN DU RESEAU 4 B PAR SUBSTITUTION DU RESEAU 12 A

Nombre de canaux substitués	0	2	8	16	26	44	202
$\alpha_s (s-1)$	11,371	17,949	34,452	53,934	75,398	112,08	204,8
$\alpha_{202} (s-1)$	11,371	17,774	33,707	52,070	71,781	104,399	181,02
ΔB^2 pulsé $(m-2)$	0	0,130	0,450	0,821	1,218	1,876	3,421
ΔB^2 critique $(m-2)$	0	0,118	0,438	0,824	1,253	1,930	3,436

8 - CONCLUSIONS

Nous pensons que les exemples d'application de la méthode des sources de neutron pulsées que nous avons donné montrent bien la validité de cette méthode et surtout son champ d'application très étendu : mesures du temps de vie des neutrons, de l'économie de réflecteur, étalonnages de barres de sécurité, mesures de laplacien par substitution, avec une précision satisfaisante. Nos expériences portaient sur des géométries relativement simples mais il est probable que les résultats resteraient valables avec des géométries plus compliquées.

Cette méthode pourra être rendue encore plus utile lorsque nous disposerons de sources plus puissantes et de compteur à plus faible perte de comptage. Nous avons l'intention de poursuivre ces expériences dans des conditions plus difficiles : géométrie du type "Argonnaut" dans RUBEOLE (réflecteurs radiaux interne et externe) et mesures sur un réacteur à uranium naturel modéré au graphite pour lequel la source de fissions spontanées est plus importante.

Manuscrit reçu le 7 septembre 1962

9 - REFERENCES

- (1) Nucl. Sc. and Eng. : 2, 595-608 (1958) A pulsed neutron technique for reactivity determination.
B.E. SIMMONS et J.S. KING
- (2) U.C.R.L. 5477 : Pulsed neutron source studies of graphite enriched uranium systems.
F.A. KLOVERSTROM et T.T. KOMOTO, 1959.
- (3) Nucl. Sc. and Eng. : 9, 291-298 (1961). Reactivity worth of the central fuel element in the bulk shielding reactor 1
G. de SAUSSURE, K. HENRY et R. PEREZ-BELLES.
- (4) Nucl. Sc. and Eng. : 11, 199-210 (1961). Prompt neutron decay constants in multiplying hydrogenous media.
D.R. BACH, S.I. BUNCH, R.J. CERBONE et R.E. SLOVACEK.
- (5) Phys. Rev. 104 n° 4, 1044 (1957). "Delayed neutrons from fissionable isotopes of uranium, plutonium and thorium".
KEEPIN, WIRUELT et ZICGLER.
- (6) Actes de la Conférence de Genève 1958 P/2146. Caractéristiques physiques d'un réacteur modéré au beryllium.
KRASIN et al.
- (7) W.A.P.R. 142 (1955) . A.F. HENRY
- (8) C.E.A. 1398 (1960). Rififi. Calcul analytique des flux d'une pile.
A.AMOUYAL et al.

(9) Actes de la conférence de Genève 1958 . P/3336. Réseaux uranium naturel-eau lourde.

Y. GIRARD et al.

(10) Actes de la conférence de Genève 1958. P/1191. Réseaux uranium naturel-graphite.

P. BACHER et al.

10 - ANNEXE

CONSTANTES DES RESEAUX UTILISEES DANS LES CALCULS
RIFIFI

Réseau	$D_{1\perp}$	$D_{1//}$	$D_{2\perp}$	$D_{2//}$	Σ_1	Σ_2	P
4B1	0,820	0,995	0,799	0,945	0,005816	0,005549	0,9422
12A	0,786	0,893	0,750	0,828	0,005822	0,008073	0,8757

11 - LISTE DES TABLEAUX

- Tableau I - Mesures de α sur le coeur non réfléchi 4 B
- Tableau II - Mesures de α sur le coeur non réfléchi 12 A
- Tableau III - Paramètres expérimentaux des quatre piles étudiées
- Tableau IV - Etalonnage d'absorbants
- Tableau V - Economie de réflecteur radial
- Tableau VI - Variation du laplacien d'une pile par substitution.

12 - LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma en coupe de RUBEOLE

Figure 2 : Schéma du montage électronique

Figure 3 : Décroissance du flux ; réseau 12 A $\Delta k = -92 \cdot 10^{-5}$

Figure 4 : Décroissance du flux ; réseau 4 B1 $\Delta k = -0,13976$

Figure 5 : $\alpha_{\text{corrigé}} = f(\Delta k)$

Figure 6 : $\alpha = f(\Delta k)$

Figure 7 : Disposition des absorbants

Figure 8 : Décroissance du flux ; 2 barres de Cadmium au centre du réacteur.

Figure 9 : Economie de réflecteur radial.

TABLE DES CHAPITRES

INTRODUCTION	Page 1
1 - RAPPEL DE LA METHODE	Page 3
2 - DESCRIPTION DU REACTEUR RUBEOLE	Page 6
3 - APPAREILLAGE EXPERIMENTAL	Page 8
4 - MESURE DU TEMPS DE VIE SUR PILE NON REFLECHIE	Page 10
5 - ETALONNAGE DE BARRES DE SECURITE	Page 19
6 - MESURES SUR PILE RADIALEMENT REFLECHIE PAR L'OXYDE DE BERYLLIUM	Page 23
7 - EXPERIENCES PULSEES EN PILE MIXTE	Page 29
8 - CONCLUSIONS	Page 32
9 - REFERENCES	Page 33
10 - ANNEXE - CONSTANTES DES RESEAUX UTILISES DANS LES CALCULS RIFIFI	Page 35
11 - LISTE DES TABLEAUX	Page 36
12 - LISTE DES FIGURES	Page 37

Figure 1

schéma en coupe de "Rubeole"

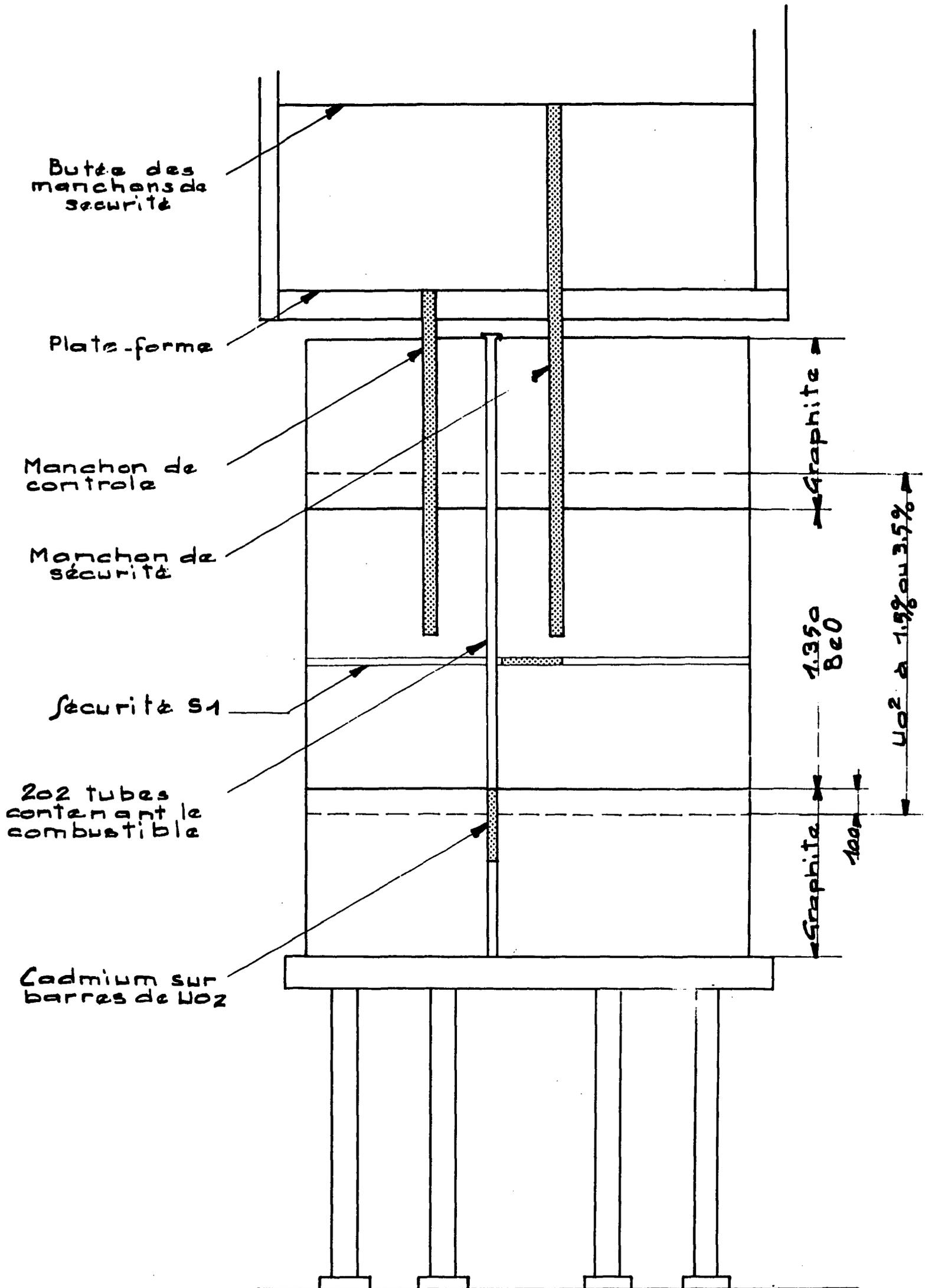
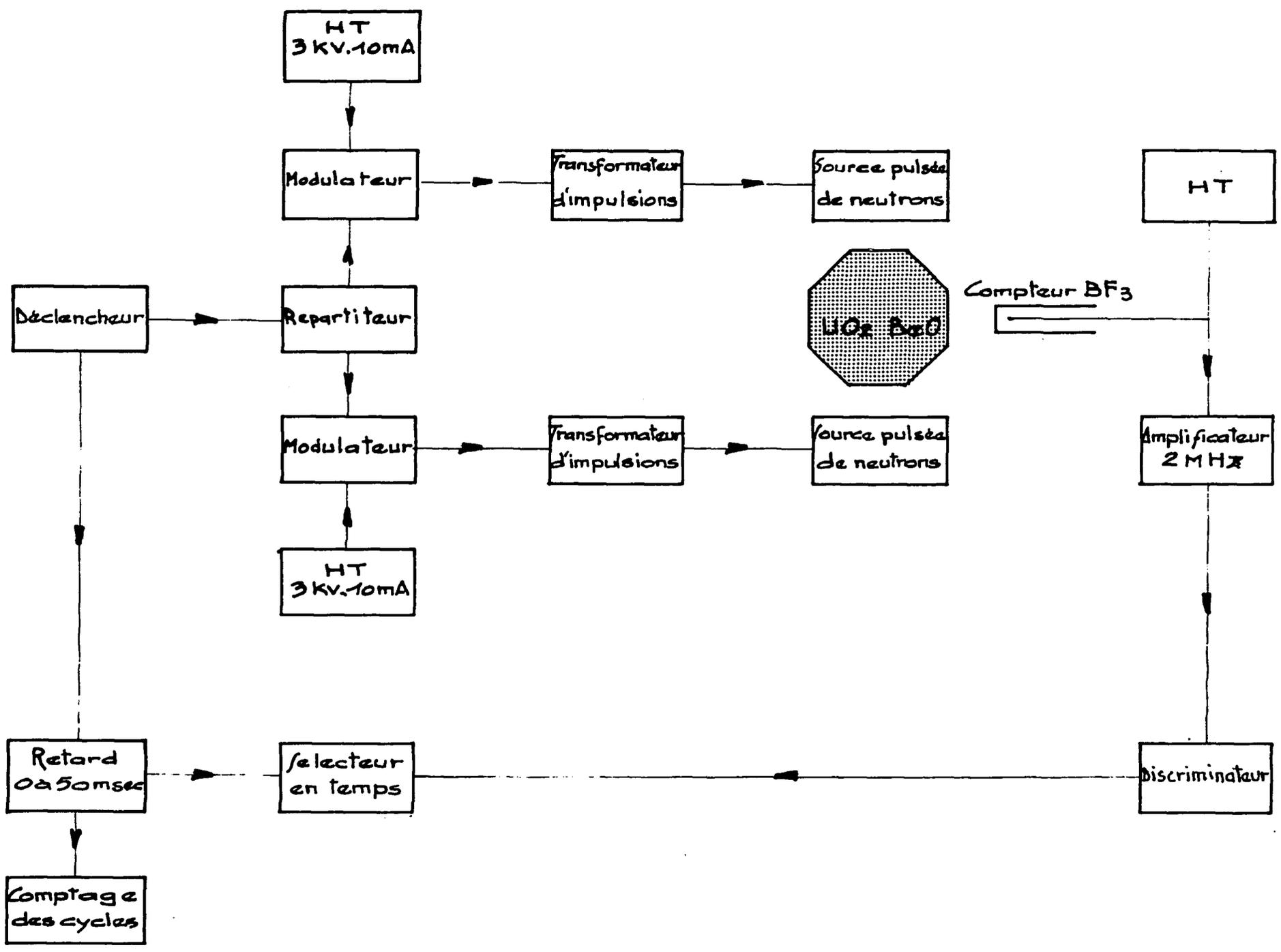


Figure 2

schéma du montage électronique



Décroissance du flux. Réseau 12A

$$\Delta k = -92 \cdot 10^{-5}$$

Canaux 1290 μ s

Retard 10 ms

$$\alpha = 17.52 \text{ s}^{-1}$$

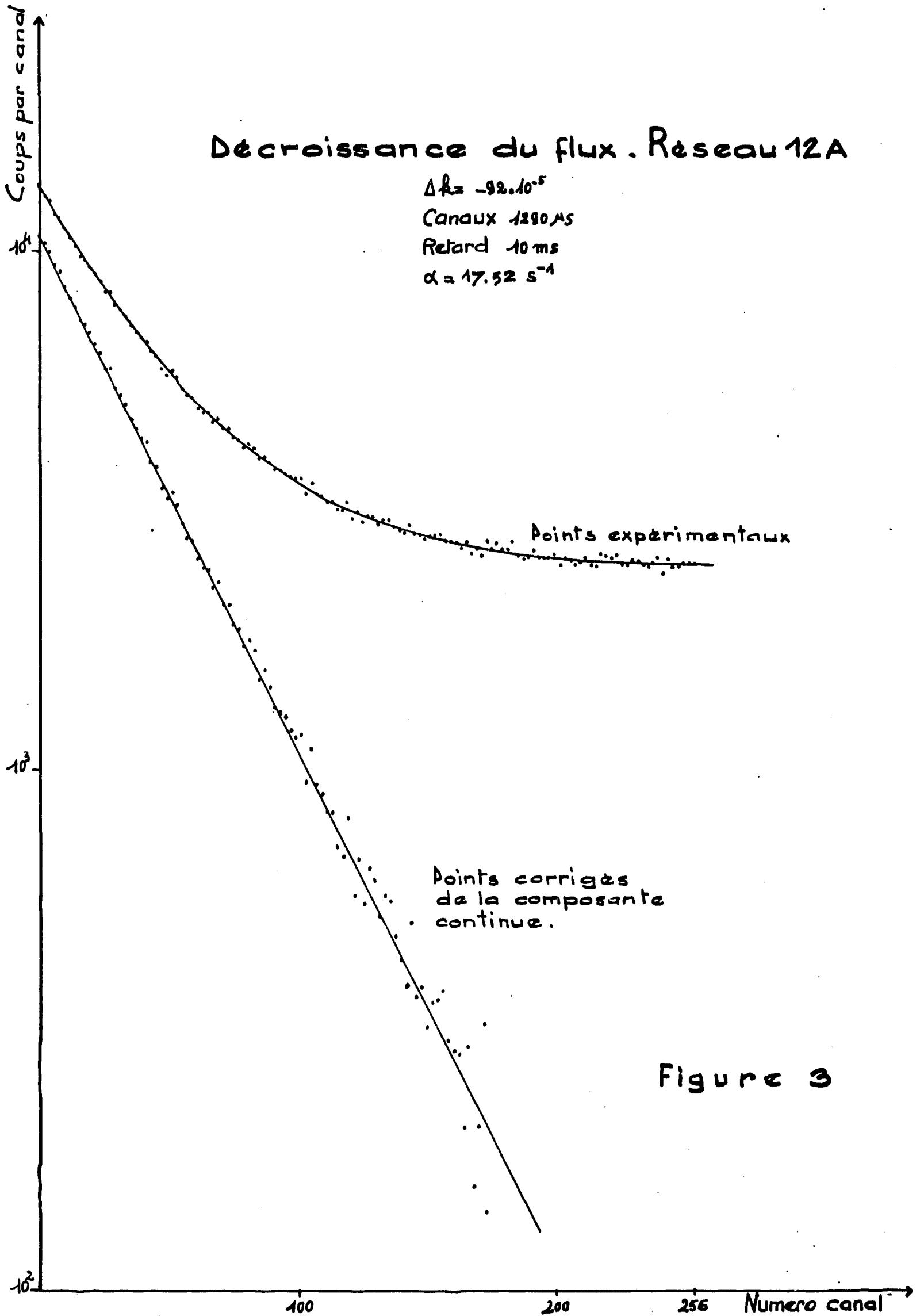
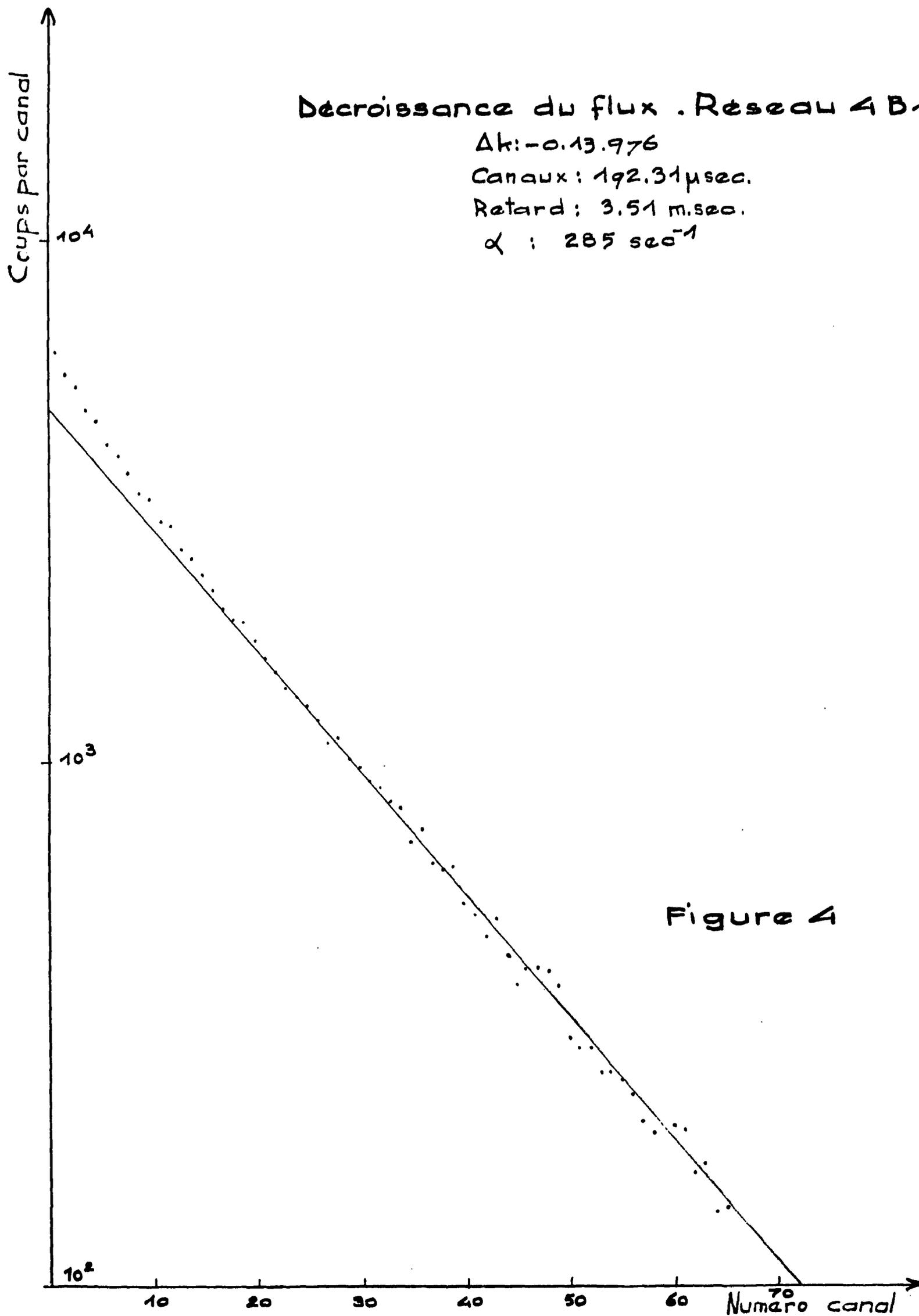


Figure 3

Décroissance du flux . Réseau 4 B1

$\Delta k: -0.13.976$
Canaux: $192.31 \mu\text{sec.}$
Retard: 3.51 m.sec.
 $\alpha: 285 \text{ sec}^{-1}$



$$\alpha_{\text{corrigé}} = f(\Delta k)$$

Réseau 12 A
" " 4B1
" " 4B1 réfléchi

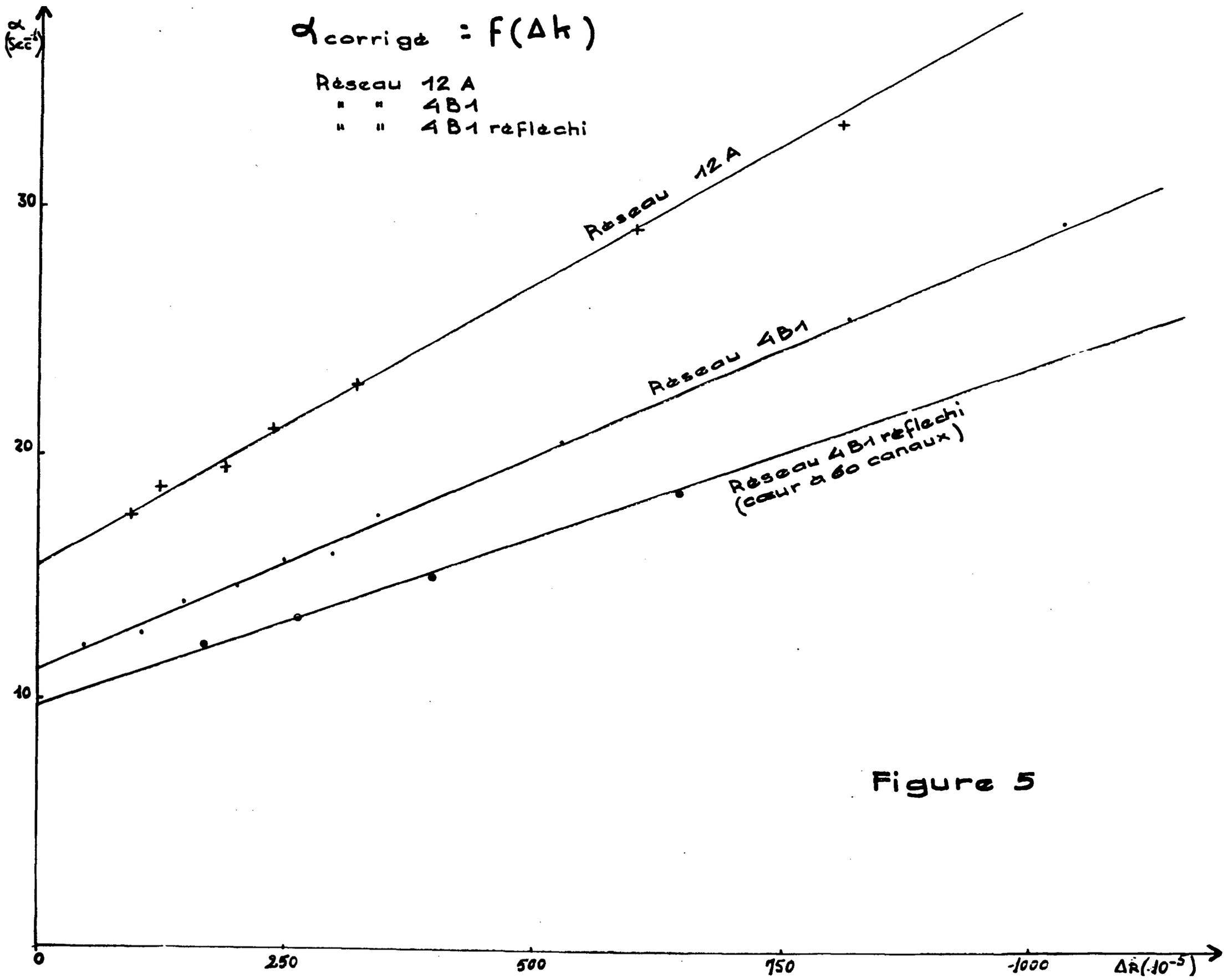


Figure 5

α
Sec⁻¹

$$\alpha = F(\Delta k)$$

Réseau 12 A
" " 4 B1
" " 4 B1 réfléchi

400

300

200

100

Réseau 12 A

Réseau 4 B1

Réseau 4 B1 réfléchi

Figure 6

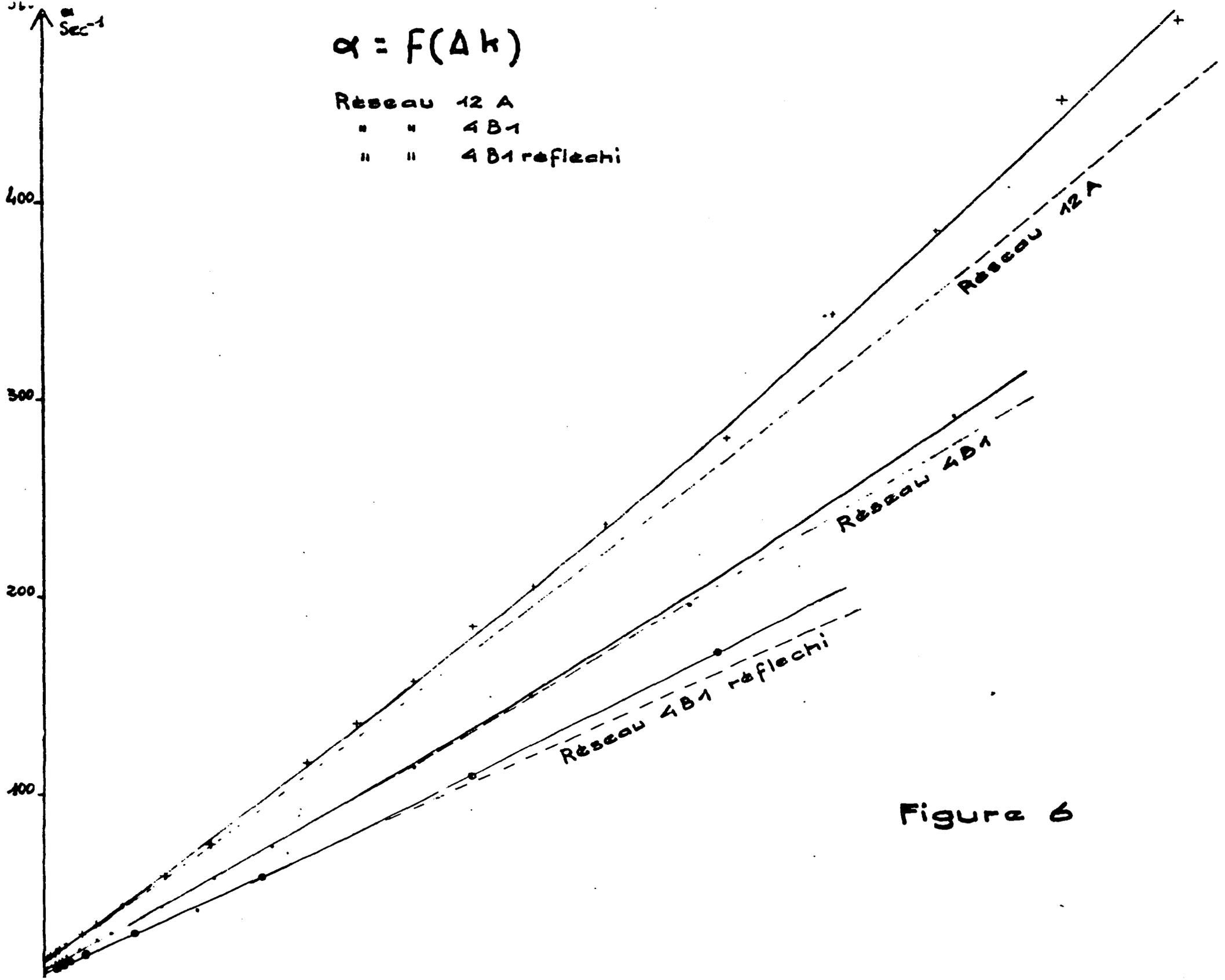
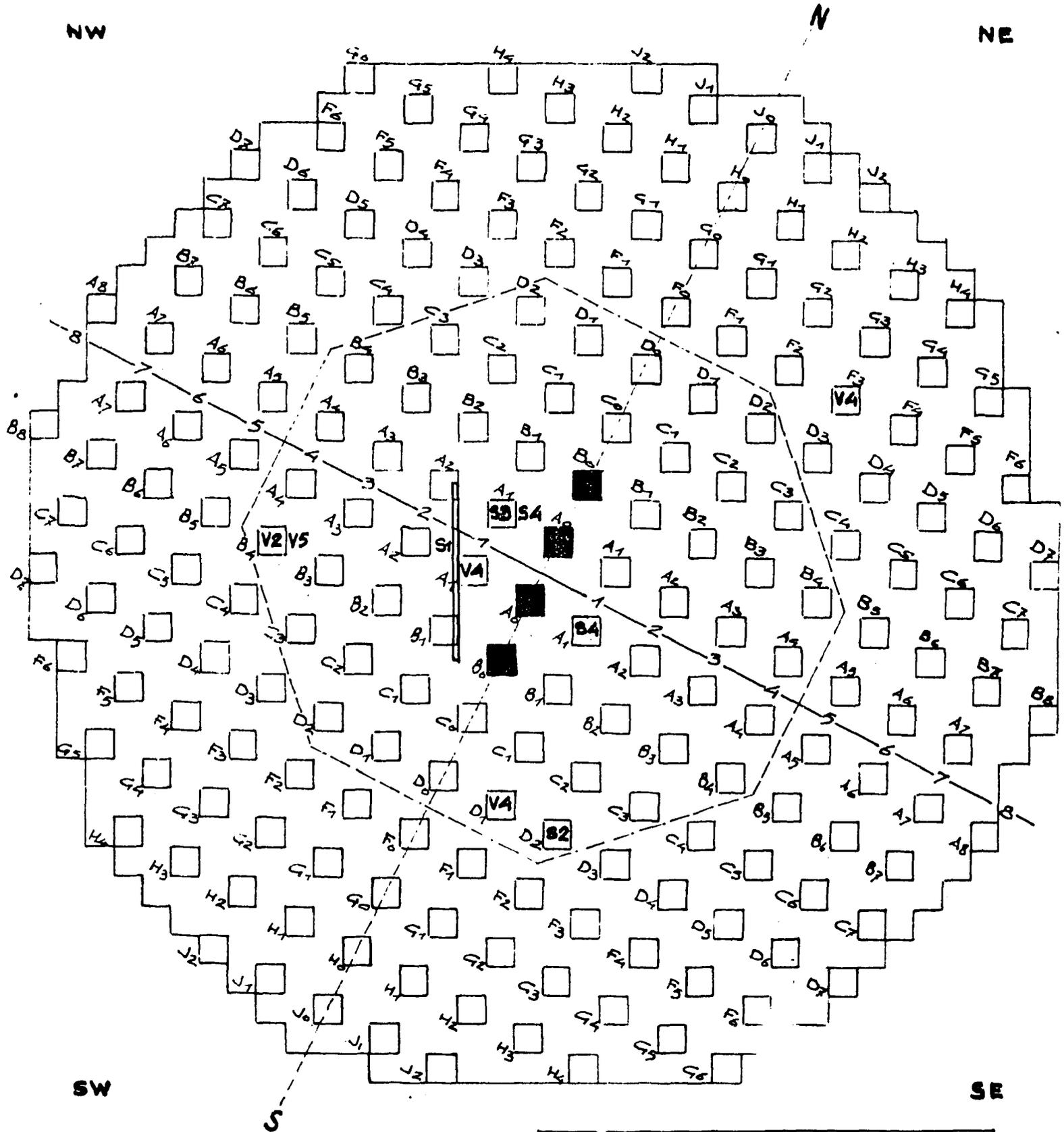


Figure 7

Rubeole II Disposition des absorbants



S	Barre de securite Cd 4/40 ϕ 39.8 mm.
V	Canal vide
Limite de chargement de la pile a 60 canaux radialement reflechie	

N ^o de mesure	Absorbants
1	Securite S1
2	1 Barre Cd S2 1 Canal vide V2
3	1 Barre Cd S3
4	2 Barres Cd S4 3 Canaux vides V4
5	1 Canal vide V5

Décroissance du flux Avec 2 barres de Cadmium au centre du réacteur

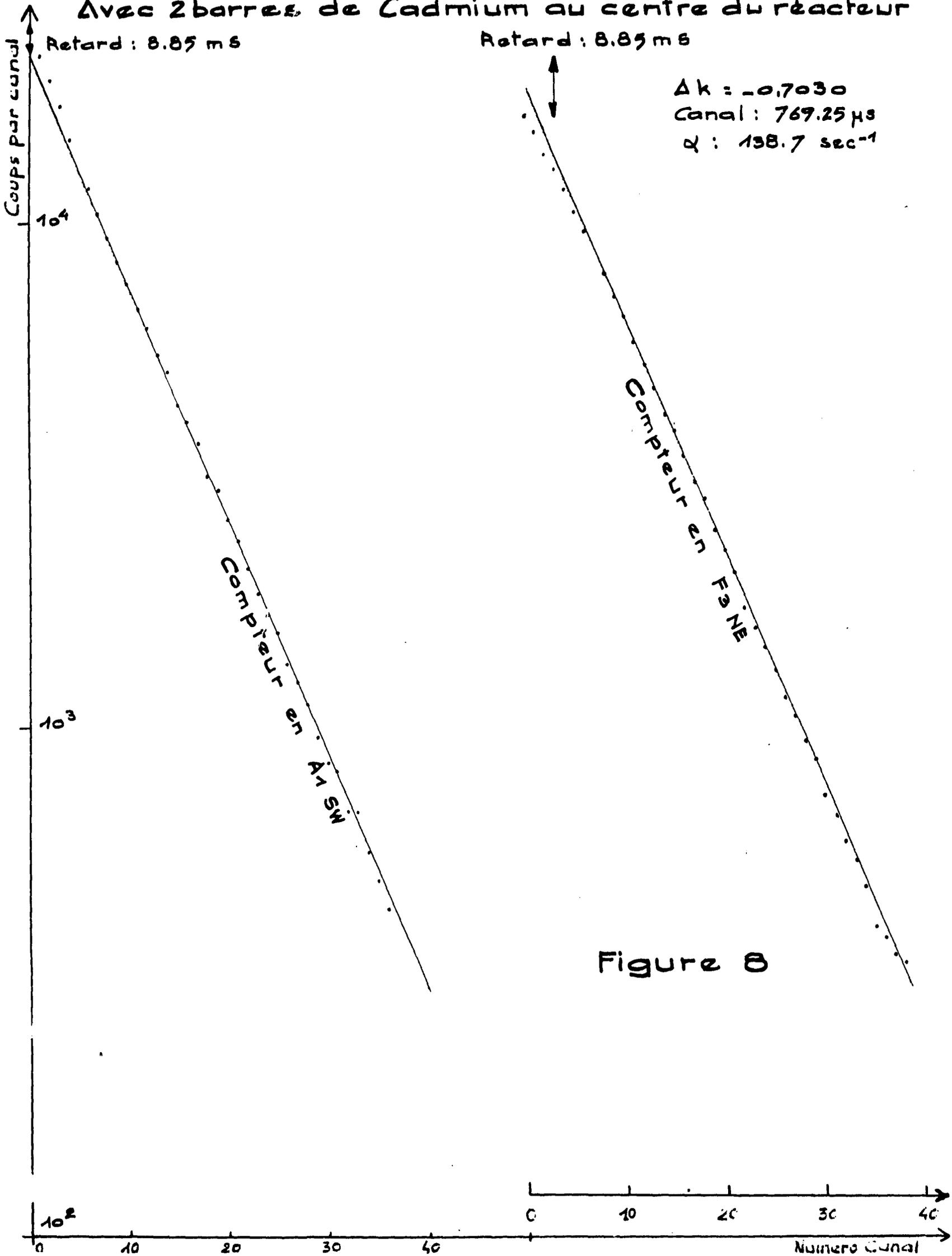


Figure 8

Economie de réflecteur radial

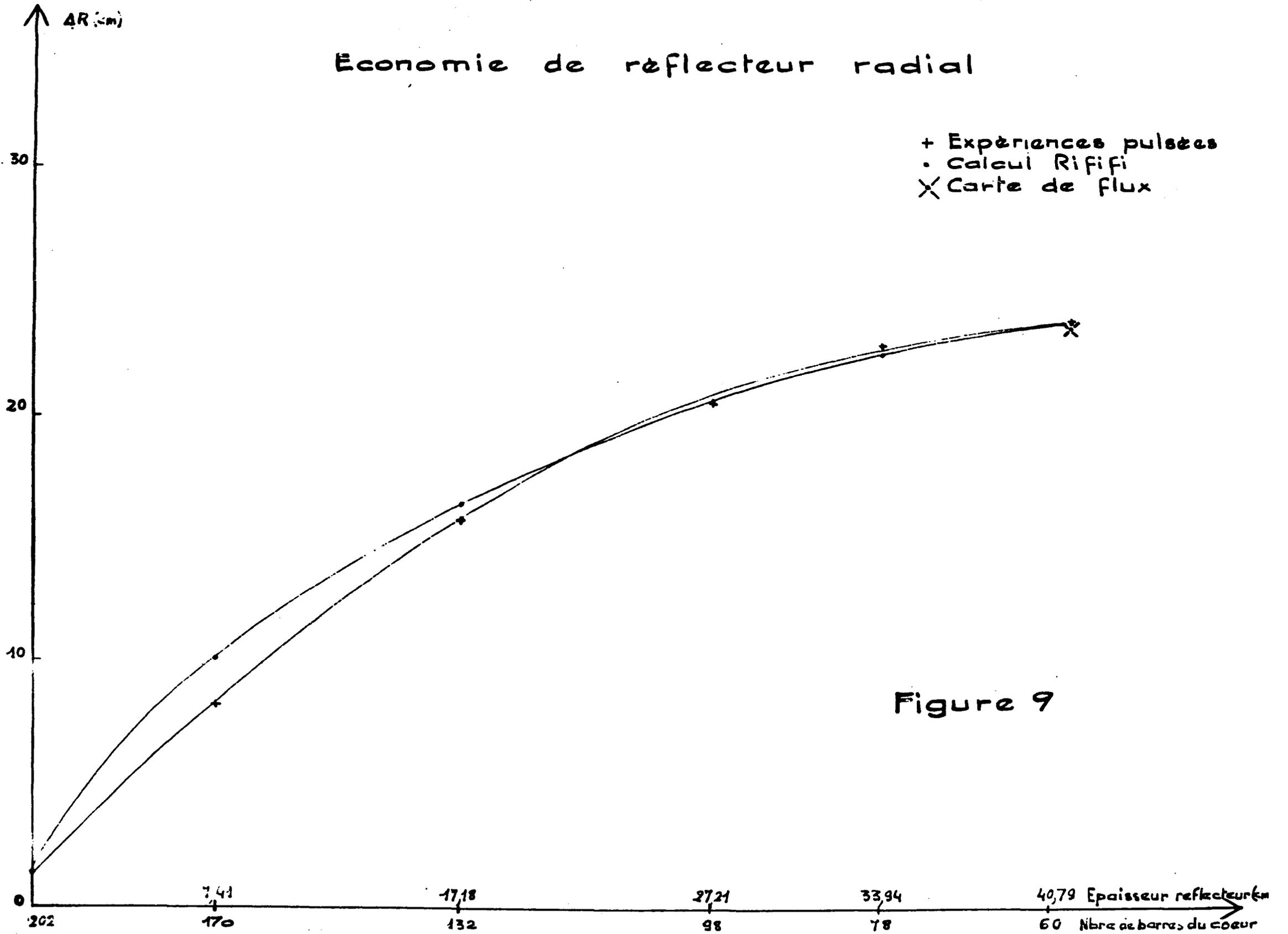


Figure 9

Décroissance du flux Avec 2 barres de Cadmium au centre du réacteur

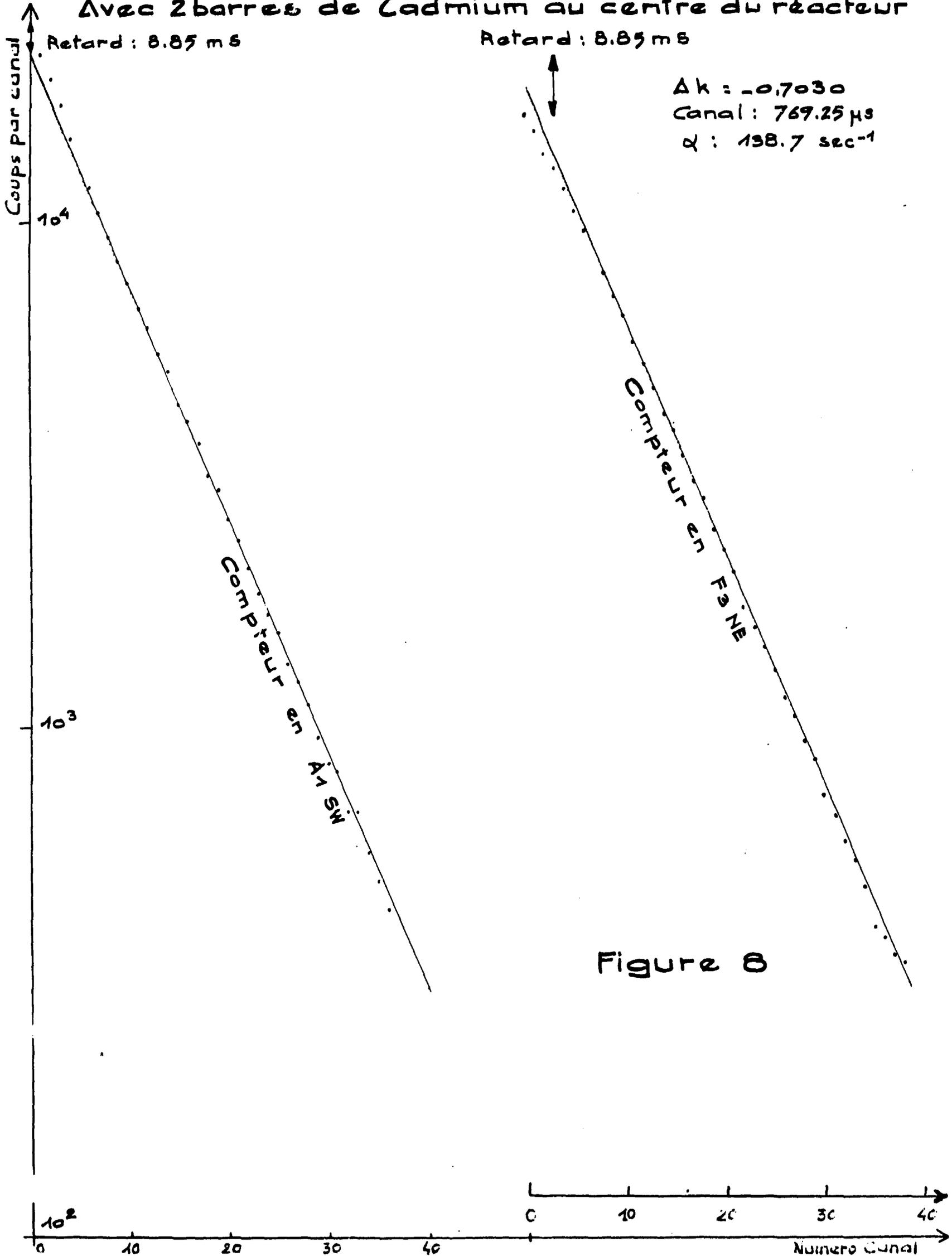


Figure 8

Economie de reflecteur radial

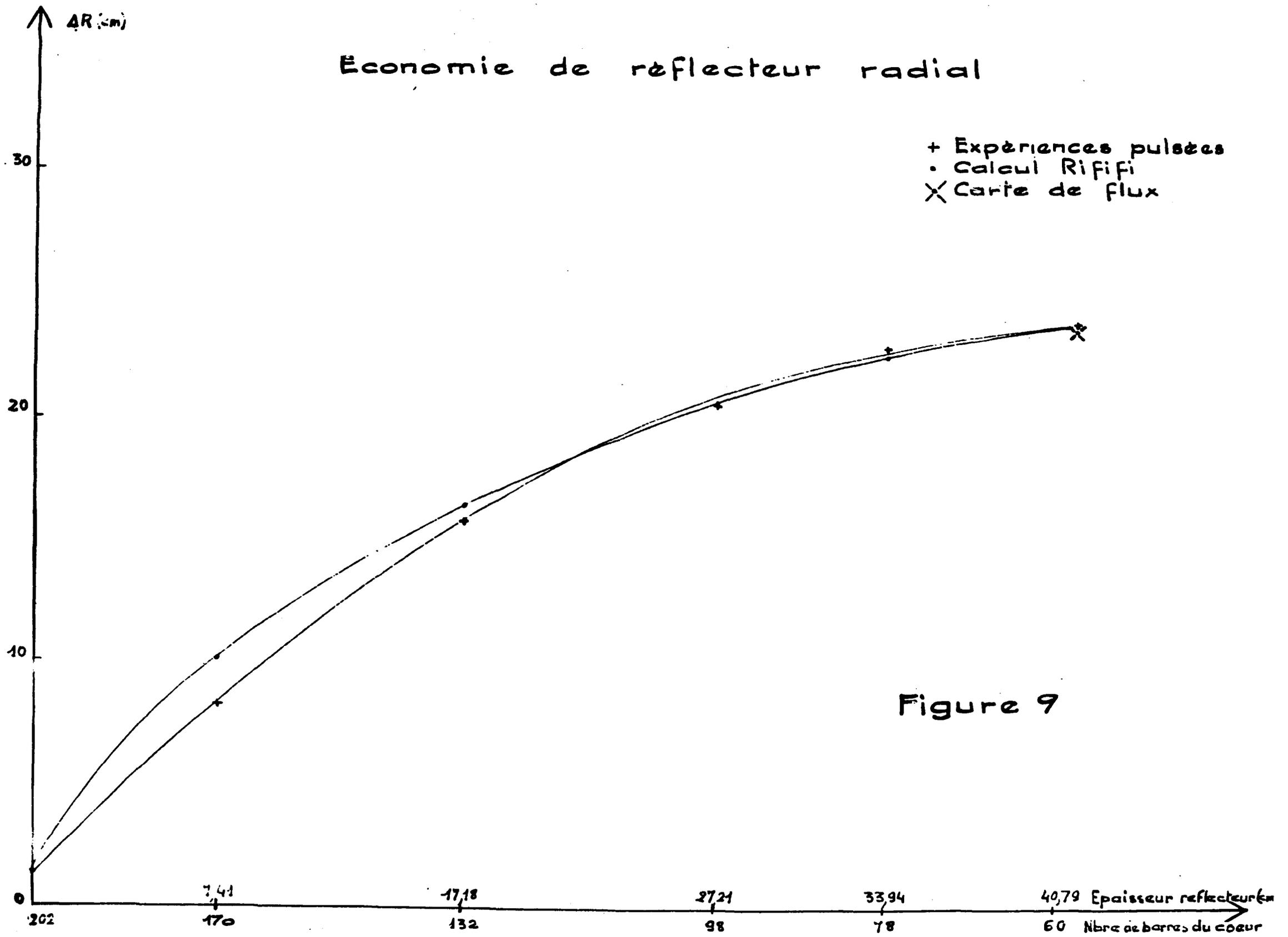


Figure 9